

**JULIANA MARIA MANIERI VARANDAS**

**Avaliação da qualidade física do solo em uma escala de microbacia**

Tese apresentada ao Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo, para a obtenção do Título de Doutor em Ciências

Área de Concentração: Energia Nuclear na Agricultura e no Ambiente

Orientador: Prof. Dr. Osny de Oliveira Santos Bacchi

Co-orientador: Dr. Carlos Manoel Pedro Vaz

**Piracicaba  
2011**

AUTORIZO A DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
**Seção Técnica de Biblioteca - CENA/USP**

Varandas, Juliana Maria Manieri

Avaliação da qualidade física do solo em um escala de microbacia / Juliana Maria Manieri Varandas; orientador Osny Oliveira Santos Bacchi, co-orientador Carlos Manoel Pedro Vaz. - - Piracicaba, 2011.

88 f.: il.

Tese (Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Ciências. Área de Concentração: Energia Nuclear na Agricultura e no Ambiente) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo.

1. Bacia Hidrográfica 2. Compactação dos solos 3. Degradação do solo 4. Densidade do solo 5. Física do solo 6. Granulometria do solo 7. Porosidade do solo 8. Textura do solo I. Título

CDU 631.43:556.51

Aos meus queridos pais Moacir e Maria  
Antonieta, com muito amor e eterna  
gratidão por dedicarem toda a sua vida,  
sem egoísmo ou vaidade alguma, para os  
filhos e para Deus.

Ao meu amado esposo Leandro e aos  
nossos filhos Estêvão, Chiara e aos que  
Deus ainda nos concederá, ofereço com  
muito carinho e também gratidão pelo  
amor e felicidade indescritível.

## AGRADECIMENTOS

Ao Dr. Osny de Oliveira Santos Bacchi e ao Dr. Carlos Manoel Pedro Vaz, agradeço a confiança, paciência e o incentivo nos momentos difíceis, me encorajando a levar à frente estes estudos e trabalhos, mas principalmente por transmitir tantos conhecimentos durante estes anos, com muita dedicação e disposição para instruir e ensinar.

Ao meu pai Moacir Carlos Manieri e minha mãe Maria Antonieta, aos meus irmãos queridos Junior e Thais, meus cunhados, agradeço por estarem sempre ao meu lado encorajando e principalmente pelo amor que sempre me dedicaram.

Ao meu querido esposo Leandro pela paciência, dedicação, cumplicidade e pelo amor em todos os momentos da nossa vida.

Aos meus amigos e irmãos de fé, que tanto me ajudaram, principalmente em suas orações.

Aos muitos amigos que fiz durante esses anos de convivência na Embrapa Instrumentação Agropecuária, que não haveria espaço para citar todos, agradeço os momentos felizes e a presença marcante e inesquecível de todos vocês em minha vida.

Ao colega Paulo Renato Orlandi Lasso, pela amizade, apoio, incentivo e companheirismo nesses anos.

Aos técnicos da EMBRAPA Instrumentação Agropecuária, que facilitaram meus trabalhos com tanta dedicação, contribuindo com seus conhecimentos e pelo companheirismo nos momentos difíceis, principalmente aos amigos José Ferrazini Júnior e Renê de Oste, agradeço muito.

Aos estagiários Wilton , José Renato e Thiago, pelo apoio no campo e laboratório.

Ao CENA pela oportunidade de realização do curso de pós-graduação, à EMBRAPA pelo apoio técnico e à FAPESP pela bolsa de estudos concedida e pelo apoio financeiro ao projeto.

À Embrapa Pecuária Sudeste pela concessão de áreas para os experimentos.

E, finalmente, meu carinho a todos àqueles que direta ou indiretamente durante este tempo estiveram ao meu lado torcendo por mim.

O tempo que não dá tempo...  
Um sonho, um desejo de conhecer a terra  
que deu vida às flores, as matas, aos alimentos  
e tantas outras muitas e muitas espécies  
e esta realidade do conhecimento também me trouxe à vida  
e esta, cheia de sabedoria, me ensinou a descansar e sonhar!  
(Maria Antonieta)

## RESUMO

VARANDAS, J. M. M. **Avaliação da qualidade física do solo em uma escala de microbacia**. 2011. 88 f. Tese (Doutorado) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

As condições físicas do solo têm efeitos diretos e indiretos na produtividade e na qualidade ambiental. Solos bem agregados, com um manejo adequado, são capazes de manter um balanço de ar e água assim como promover a ciclagem de nutrientes e propiciar o desenvolvimento de raízes. O objetivo desse trabalho foi avaliar o uso do modelo de Dexter – índice S, para o mapeamento da qualidade física do solo em uma escala de microbacia hidrográfica (MB) e avaliar o desempenho do modelo indireto de Arya e Paris e programa Qualisolo para a obtenção do índice S. O experimento foi dividido em três etapas: 1) Medida do índice S em uma base de dados de solos contendo 111 amostras e avaliação da sua dependência com a densidade do solo. Em todas as amostras obteve-se o índice S de duas formas: i) a partir da curva de retenção (CR) experimental ( $S_{CR\text{experimental}}$ ) e ii) por meio da granulometria detalhada, usando o modelo de Arya e Paris com o programa Qualisolo ( $S_{CR\text{qualisolo}}$ ); 2) Estudo do índice S em uma escala de microbacia hidrográfica (MB), 15 parcelas na MB do Ribeirão Canchim, São Carlos, SP, compreendendo classes de solos e coberturas mais comumente encontradas nessa região. 3) Ampliação do estudo do índice S na microbacia, realizando medidas de granulometria, densidade ( $\rho_s$ ), resistência à penetração (RP) e a obtenção do índice  $S_{CR\text{qualisolo}}$  em mais trinta pontos da MB. Na comparação entre os métodos para o cálculo do índice S verificou-se que  $S_{CR\text{experimental}}$  apresentou uma maior variabilidade entre seus pontos, demonstrando ser mais sensível as variações de  $\rho$ , textura ou estrutura. Apesar do modelo de Arya e Paris receber uma forte influência da textura do solo, sua determinação integrado ao programa Qualisolo, demonstrou ser uma opção rápida para obter a curva de retenção e o índice S. Com relação ao estudo do índice S na MB, as áreas de pastagem apresentaram os maiores valores de RP,  $\rho_s$  e  $\rho_{\text{relativa}}$  e os menores valores de índice S, sendo classificadas como solos de qualidade física pobre. Os valores de S apresentaram a mesma tendência dos parâmetros do solo que estão associados com a qualidade física, que são  $\rho_s$  e RP, porosidade, curva de retenção e a avaliação qualitativa e quantitativa das imagens de microtomografia que estão associadas com a macroporosidade. Apesar de ser possível uma classificação visual do solo em relação a sua qualidade física, o índice S é possibilita uma avaliação quantitativa e objetiva do estado de degradação física do solo, uma vez que possui uma boa correlação com os demais parâmetros que indicam a qualidade do solo, como observado.

Palavras-chave: índice S, modelo de Arya e Paris, curva de retenção, Qualisolo

## ABSTRACT

VARANDAS, J. M. M. **Evaluation of soil physical quality in a watershed scale.** 2011. 88 f. Tese (Doutorado) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

The soil physical conditions have direct and indirect effects on plant productivity and environmental quality. Well aggregated soils with appropriate management are able to maintain a good balance between air and water, promote nutrient cycling and good development of roots. The objective of this work was to evaluate the use of the S index of Dexter, for mapping the soil physical quality in a watershed and evaluate the performance of the indirect model of Arya and Paris and the Qualisolo software to estimate the S index. The study was divided into three parts: Measurement of the S index in a database containing 111 soils and the evaluation of their dependence with the soil bulk density ( $\rho_s$ ). For all samples the S index was determined by: i) using the experimental soil water retention curve ( $S_{RC\text{experimental}}$ ) and ii) using the Arya and Paris model and the Qualisolo software ( $S_{RC\text{qualisolo}}$ ) on measured particle size distribution data; 2) The study of the S index in 15 points of the Ribeirão Canchim watershed, São Carlos, SP, covering the most abundant soil classes and the most commonly used crops in this region; 3) Extension of the S index study to other 30 points where only the  $S_{CR\text{qualisolo}}$  was determined from measured particle size distribution and compared with measured  $\rho_s$  and penetration resistance (PR). When comparing the two methods for determining S it was verified that  $S_{RC\text{experimental}}$  presented a greater variability among points, showing to be more sensitive to variations in  $\rho_s$ , texture and structure. Although the significant influence of soil texture on the Arya and Paris model, the estimation of  $S_{CR\text{qualisolo}}$  from particle size distribution is very simple and faster than  $S_{CR\text{qualisolo}}$  and it is an interesting alternative. The areas under pasture presented the lowest S index and the highest  $\rho_s$  and were classified as low physical quality areas. The S values follow the same trends of the soil parameters associated with soil quality, which are  $\rho_s$ , PR, porosity, the soil water retention curves and the qualitative and quantitative parameters of the microtomographic images. The S index allows a quantitative and objective measure and expresses the state of physical degradation of soil, since it showed a good correlation with other parameters associated with soil physical quality.

Keywords: index, Arya and Paris model, soil water retention, Qualisolo

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Curva de retenção da água no solo para três classes de texturas (adaptado de Dexter e Czyz, 2007) .....	19
Figura 2 - O ponto de inflexão é quando a curvatura da curva de retenção da água é zero. A inclinação do ponto de inflexão é dado por $S = \tan \omega$ . (adaptado de Dexter e Czyz, 2007) .	20
Figura 3 - Curvas de retenção de água de um mesmo solo franco areno argiloso com duas densidades do solo diferentes. A degradação física do solo ocorre quando o solo é compactado, e reduz a inclinação da curva de retenção no ponto de inflexão. Adaptado de Dexter (2004a).....	22
Figura 4 - Fazenda Canchim e Microbacia Hidrográfica do Ribeirão Canchim – EMBRAPA/ CPPSE .....	27
Figura 5 - Pedologia da Fazenda Canchim, Embrapa-CPPSE. LVA: Latossolo Vermelho Amarelo; LVE: Latossolo Vermelho Escuro; LVdf: Latossolo Vermelho distroférico; NV: Nitossolo Vermelho; PV: Argissolo Vermelho e NQ: Neossolo Quartzarênico.....	29
Figura 6 - Equipamentos utilizados para a determinação da curva de retenção da água no solo, no laboratório de física do solo do Instituto Agrônômico (IAC). Em (a) câmaras de pressão para extração de água em altas pressões e em (b) câmaras de pressão para a extração da água em baixas pressões.....	34
Figura 7 - Sistema de transmissão de raios gama para medida da granulometria de solos.	35
Figura 8 - Microtomógrafo SkyScan 1172 .....	37
Figura 9 - Exemplos de curvas de retenção utilizadas para o cálculo do índice S, com solo de textura arenosa e argilosa, respectivamente: a) experimentalmente (vermelho) e b) <i>estimada</i> pelo modelo de Arya e Paris utilizando o <i>Qualisolo</i> (azul). As linhas contínuas representam o modelo de van Genuchten ajustados aos dados experimentais e estimados. ....	41
Figura 10 - Relação entre valores de índice S calculados através do programa Qualisolo ( $S_{CR\text{qualisolo}}$ ) x S calculado a partir da curva de retenção experimental ( $S_{CR\text{experimental}}$ ).....	43
Figura 11 - Efeito da densidade e da textura nos valores de índice S calculado para as 111 amostras, a partir da curva de retenção experimental (a) e da curva de retenção estimada utilizando o programa Qualisolo (método de Arya e Paris) (b). ....	45
Figura 12 - Influencia da densidade no índice S para os solos arenosos (a) e de textura média (b). ....	46
Figura 13 - Influencia de densidade no índice S para os solos de textura argilosa. ....	46
Figura 14 – Densidade máxima ( $\rho_{\text{max}}$ ) em função do teor de argila.....	51
Figura 15 - Perfil da resistência à penetração (RP) de 0-40 cm, para o Latossolo Vermelho Amarelo (LVA) e para o Latossolo Vermelho (LV) sob diferentes coberturas.....	51

- Figura 16 - Perfil da resistência à penetração (RP) de 0-40 cm, para o Latossolo Vermelho distroférico (LVdf) e Nitossolo Vermelho (NV), sob diferentes coberturas do solo..... 52
- Figura 17 - Perfil da resistência à penetração (RP) de 0-40 cm, para o Neossolo Quartzarênico órtico (RQo), sob diferentes coberturas do solo. .... 52
- Figura 18 - Imagens de microtomografia computadorizada de amostras cilíndricas de cerca de 2 cm de diâmetro por 2 cm de altura do Latossolo Vermelho Amarelo sob área de mata pastagem, eucalipto, milho, sorgo e cana-de-açúcar (pixel da imagem de 14,8  $\mu\text{m}$ , com filtro de Al+Cu)..... 54
- Figura 19 - Imagens de microtomografia computadorizada de amostras cilíndricas de cerca de 2 cm de diâmetro por 2 cm de altura do Latossolo Vermelho sob área de mata, pastagem e milho (pixel da imagem de 14,8  $\mu\text{m}$ , com filtro de Al+Cu). .... 55
- Figura 20 – Imagens de microtomografia computadorizada de amostras cilíndricas de cerca de 2 cm de diâmetro por 2 cm de altura do Latossolo Vermelho distroférico sob área de mata e pastagem, (pixel da imagem de 14,8  $\mu\text{m}$ , com filtro de Al+Cu)..... 56
- Figura 21 - Imagens de microtomografia computadorizada de amostras cilíndricas de cerca de 2 cm de diâmetro por 2 cm de altura do Nitossolo Vermelho sob área de mata e pastagem (pixel da imagem de 14,8  $\mu\text{m}$ , com filtro de Al+Cu). .... 56
- Figura 22 - Imagens de microtomografia computadorizada de amostras cilíndricas de cerca de 2 cm de diâmetro por 2 cm de altura do Neossolo Quartzarênico órtico sob área de mata e pastagem (pixel da imagem de 14,8  $\mu\text{m}$ , com filtro de Al+Cu). .... 57
- Figura 23 - Comparação entre a macroporosidade determinada pela microtomografia, a porosidade total e a macroporosidade obtida pela curva de retenção..... 58
- Figura 24 – curva de retenção da água nos solos LVA e LV de 0-10 e 10-30 cm, para diversas culturas..... 61
- Figura 25 – Curvas de retenção da água nos solos LVdf e NVef de 0-10 e 10-30 cm, em mata e pastagem. .... 62
- Figura 26 - Curvas de retenção da água no solo RQo de 0-10 e 10 – 30 cm, em mata e pastagem..... 63
- Figura 27 – Comparação entre os valores de S determinados diretamente da curva de retenção experimental ( $S_{\text{CRexperimental}}$ ) e da curva estimada pelo Qualisolo ( $S_{\text{CRqualisolo}}$ )..... 65
- Figura 28 - Valores correspondentes de S para as 15 áreas estudadas da MBH do Ribeirão Canchim. .... 66
- Figura 29 - Correlação entre os valores do índice S calculado a partir da curva de retenção estimada pelo modelo de Arya e Paris ( $S_{\text{CRqualisolo}}$ ) e experimental ( $S_{\text{CRexperimental}}$ ) versus densidade global do solo ( $\rho$ ) e densidade relativa, para os principais solos encontrados na MBH do Ribeirão Canchim..... 69
- Figura 30 - Correlação entre os valores do índice S calculado a partir da curva de retenção estimada pelo modelo de Arya e Paris ( $S_{\text{CRqualisolo}}$ ) e experimental ( $S_{\text{CRexperimental}}$ ) versus água disponível e porosidade total obtida da curva de retenção, para os principais solos encontrados na MBH do Ribeirão Canchim. .... 70

Figura 31 - Correlação entre os valores do índice S calculado a partir da curva de retenção estimada pelo modelo de Arya e Paris ( $S_{CR_{Qualisolo}}$ ) e experimental ( $S_{CR_{experimental}}$ ) versus macroporosidade, obtida da curva de retenção e porosidade estimada, para os principais solos encontrados na MBH do Ribeirão Canchim. ....	71
Figura 32 - Correlação entre os valores do índice S e de resistência à penetração (RP) em MPa para os principais solos encontrados na MBH do Ribeirão Canchim: Latossolo Vermelho Amarelo, Latossolo Vermelho, Latossolo Vermelho distroférico, Nitossolo Vermelho e Neossolo Quartzarênico sob diferentes coberturas. ....	72
Figura 33 – Tela para demonstração de resultados do programa Qualisolo. ....	76
Figura 34 – Correlação entre os valores de densidade e índice $S_{CR_{Qualisolo}}$ . ....	77
Figura 35 – Correlação entre a densidade do solo e $S_{CR_{Qualisolo}}$ . ....	77
Figura 36 – Qualidade física do solo na Microbacia hidrográfica do Ribeirão Canchim na profundidade de 0-10 cm. ....	78
Figura 37 - Qualidade física do solo na Microbacia hidrográfica do Ribeirão Canchim na profundidade de 10-30 cm. ....	78
Figura 38 - Mapa de uso do solo da área em estudo (adaptado de SILVA et.al, 2010) .....	79

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Pontos amostrados no estudo.....	29
Tabela 2 - Informações sobre parâmetros analisados e métodos utilizados.....	33
Tabela 3 – Média, desvio padrão (DP), valor máximo e mínimo de alguns parâmetros físicos de cada conjunto de solos usados para a estimativa da curva de retenção de água do solo. ....	42
Tabela 4 - Valores referentes a moda, média, desvio padrão da média (DP), mínimo e máximo, para as 111 amostras de solo.....	44
Tabela 5 - Umidade de saturação, umidade residual, umidade na capacidade de campo e água disponível para os 15 solos estudados.....	48
Tabela 6 – Principais parâmetros físicos avaliados para as quinze áreas amostradas da MBH do Ribeirão Canchim.....	50
Tabela 7 - Comparação entre os valores em porcentagem de porosidade total obtidos por dois métodos: curva de retenção de água no solo e microtomografia computadorizada. ....	58
Tabela 8 – Índice S obtidos com a curva de retenção experimental e estimada pelo Qualisolo para as quinze áreas estudadas da MBH. ....	64
Tabela 9 - Valores médios de argila do solo ( $\text{kg kg}^{-1}$ ), $\rho$ ( $\text{g cm}^{-3}$ ), $\rho_{\text{maxima}}$ ( $\text{g cm}^{-3}$ ), $\rho_{\text{relativa}}$ ( $\text{g cm}^{-3}$ ), $u$ ( $\text{kg kg}^{-1}$ ) e RP (MPa) dos trinta pontos amostrados na MBH do Ribeirão Canchim.....	74

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
<b>2 OBJETIVOS .....</b>	<b>16</b>
<b>3. REVISÃO DA LITERATURA .....</b>	<b>17</b>
3.1 Qualidade Física do Solo .....	17
3.2 Teoria sobre o parâmetro S .....	19
3.3 Modelo de Arya e Paris e o Programa Qualisolo .....	24
<b>4 MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>27</b>
4.1 Área de estudo .....	27
4.2 Metodologia .....	32
4.2.1 Estudo da estimativa do índice S pelo modelo de Arya e Paris.....	32
4.2.2 Avaliação do índice S em escala de microbacia.....	33
4.2.3 Ampliação do estudo do índice S na escala da microbacia.....	33
4.3 Detalhamento sobre parâmetros analisados e métodos utilizados.....	34
4.3.1 Curva de retenção da água no solo.....	34
4.3.2 Análise Granulométrica .....	35
4.3.3 Resistência à Penetração.....	35
4.3.4 Umidade do solo ( $\theta$ ) .....	36
4.3.5 Densidade do solo ( $\rho$ ) .....	36
4.3.6 Estrutura e Distribuição de Poros .....	37
4.3.7 Georeferenciamento .....	38
4.3.8 Determinação do índice S .....	39
<b>5 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>41</b>
5.1 Estudo da estimativa do índice S pelo modelo de Arya e Paris .....	41
5.2 Avaliação do índice S em escala de microbacia .....	47

5.2.1 Parâmetros físicos do solo .....	47
5.2.2 Índice S medido e estimado nos 15 pontos da microbacia.....	63
5.3 Ampliação do estudo do índice S em escala de microbacia.....	73
<b>6 CONCLUSÕES .....</b>	<b>80</b>

## 1 INTRODUÇÃO

As condições físicas do solo têm efeitos diretos e indiretos na produtividade e na qualidade ambiental. Solos bem agregados, com um manejo adequado, são capazes de manter um balanço de ar e água assim como promover a ciclagem de nutrientes e propiciar o desenvolvimento de raízes, sendo resistente a erosão hídrica, selamento superficial e outros processos erosivos. (DORAN; PARKIN, 1994). Na última década os cientistas de solos têm se preocupado, predominantemente, com dois aspectos: identificar e selecionar indicadores, relacionados a propriedades físicas, químicas ou biológicas do solo, associados a determinadas funções que o solo deve desempenhar e definir valores quantitativos e mensuráveis desses indicadores. Para atribuir um valor às qualidades do solo, tem-se primeiramente que identificar seu estado atual e compará-lo às suas condições originais. Essa ação permite acessar o estado de conservação, degradação ou recuperação de determinado solo.

Diversos autores têm citado a compactação (IMHOFF et al., 2000; SUZUKI, 2005; GIAROLA et al., 2007), a estrutura (CARTER, 1988; KAY, 1990; PERFECT et al., 1990; REINERT et al., 1990; ANGERS, 1992; WOHLLENBERG et al., 2004), a infiltração de água (ALVES et al., 2005; TREIN et al., 1991; BERTOL et al., 1998; CASSOL, 2003; LANZANOVA, 2005; ALVES et al., 2007) e a densidade (SCAPINI et al., 1997; SILVA et al., 2000b; ALVES et al., 2007), como sendo bons indicadores da qualidade física do solo. Dexter (2004a) estabeleceu, após diversos estudos realizados, um índice, denominado por S (índice de qualidade física do solo). O conceito teórico para obter o valor de S foi baseado na definição da curva de retenção de água do solo, expressando a relação entre a umidade a base de massa ( $u$ ,  $\text{kg kg}^{-1}$ ) e o logaritmo (base neperiana), do potencial da água no solo ( $\psi$ , hPa), definido-se S como a inclinação da curva de retenção da água do solo no seu ponto de inflexão. S pode ser determinado diretamente a partir da curva de retenção. No entanto, os valores de  $\psi(u)$  podem ser ajustados por uma função matemática e a inclinação da curva de retenção da água do solo no seu ponto de inflexão pode ser calculada a partir das estimativas dos parâmetros da função utilizada.

Com a finalidade de minimizar os erros na obtenção de S e agilizar o diagnóstico da qualidade física do solo Naime et al. (2006) desenvolveram um programa de computador, denominado “*Qualisolo*”. O uso do referido programa permite determinar o valor S partindo-se da análise granulométrica medida pelo sistema de transmissão de raios gama (NAIME et al., 2001), da densidade do solo, e com aplicação do modelo de Arya e Paris (1981), validado para solos brasileiros (VAZ et al., 2005), estima-se a curva de retenção da água no solo. Dessa forma o Qualisolo pode fornecer a curva de retenção da água do solo, o valor S (DEXTER, 2004a), e o valor S em função da densidade, faixa de umidade ótima para o manejo, e a condutividade hidráulica do solo na faixa de umidade ótima (DEXTER, 2004b). Com a utilização de um sistema de transmissão de raios gama e com o Qualisolo, é possível obter todos esses parâmetros em no máximo 24 horas.

## 2 OBJETIVOS

O presente trabalho teve como objetivo principal:

Avaliar o uso do modelo de Dexter – índice S, para o mapeamento da qualidade física do solo em uma escala de microbacia hidrográfica e avaliar o desempenho do modelo indireto de Arya e Paris e o programa Qualisolo para a obtenção do índice S.

E como objetivos específicos:

- i) Realizar medidas de parâmetros físicos do solo como a granulometria com o analisador granulométrico automático, retenção de água no solo, densidade global, porosidade, resistência à penetração e umidade nos diferentes ambientes da Microbacia hidrográfica do Ribeirão Canchim;
- ii) Determinar o índice S para cada ambiente utilizando a medida direta na curva de retenção medida e pela estimativa da curva de retenção obtida pelo modelo de Arya e Paris e o Qualisolo;
- iii) Correlacionar os valores do índice S com as propriedades físicas dos solos determinados para áreas cultivadas e sob mata nativa ou de pouca interferência;
- iv) Com os índices de qualidade física do solo, obtidos pelo modelo de Dexter, realizar um mapeamento da região estudada, considerando os diversos usos e tipos de solos;
- v) Com os mapas, realizar um estudo de possíveis impactos causados pelas atividades agrícolas na qualidade física do solo.

### 3. REVISÃO DA LITERATURA

#### 3.1 Qualidade Física do Solo

A qualidade dos solos, segundo Gregorich e Carter (1997), tem duas feições – uma ligada à capacidade inerente do solo e outra ligada à parte dinâmica desse, influenciada pelo seu uso e manejo. Por isso, alguns anos são necessários para se verificar a resposta das propriedades do solo às alterações do sistema de manejo. Dessa forma, preferencialmente, a qualidade do solo deve ser avaliada em experimentos ou áreas agrícolas com histórico de manejo de longa duração (MOTTA et al., 2000). Outra dificuldade reside em selecionar quais propriedades do solo serão avaliadas e definir os valores considerados adequados ou ideais, os quais podem ser variáveis de acordo com a classe de solo investigada (ARSHAD; MARTIN, 2002). Araújo et al. (2007), avaliaram a qualidade do solo, utilizando dentre outros, atributos de natureza física, em áreas ou glebas de diferentes usos. Como indicadores estudaram a densidade do solo, porosidade total, resistência à penetração e taxa de infiltração de água e verificaram diferenças significativas de qualidade física do solo entre as áreas avaliadas. Tendo como referência o solo sob Cerrado nativo, verificaram que na camada superficial nas áreas sob pastagem plantada e cultivo convencional ocorrem os valores mais altos de densidade e, conseqüentemente, mais baixos de porosidade total. A introdução de sistemas agrícolas em substituição às florestas causa um rompimento do equilíbrio entre o solo e o meio, modificando desta forma, suas propriedades químicas, físicas e biológicas, podendo limitar a utilização agrícola do solo. Estas alterações ocorrem na medida em que os ecossistemas naturais vão sendo substituídos por atividades voltadas para fins industriais ou para produção de alimentos (GODEFROY; JACQUIN, 1975; CENTURION et al., 2001). De modo geral, o solo mantido em estado natural, apresenta características físicas adequadas ao desenvolvimento normal das plantas (ANDREOLA et al., 2000).

Em estudos realizados sob vegetação nativa, comparando com áreas cultivadas Reynolds et al. (2002), constataram alterações de diversos parâmetros físicos do solo, sendo a porosidade e densidade as que sofreram maiores

alterações, o que também é comprovado em Islam e Weil (2000) e em Silva e Ribeiro (1992). Araujo et al. (2004), em um estudo das propriedades físicas de um Latossolo Vermelho, também verificaram essa diferença quando compararam área sob cultivo e área nativa. Os resultados indicaram valores significativamente maiores de densidade do solo e menores de macroporosidade e porosidade total na área cultivada.

Topp et al. (1997) afirmam que um solo com uma boa qualidade física não deve ser somente um solo capaz de manter uma boa estrutura, resistir a pressões, erosão e compactação, mas também deve conter uma estrutura que ofereça um crescimento radicular sem restrição e a proliferação da fauna e flora do solo. Deve ter também boa infiltração de água e armazenamento que permitam uma correta proporção de água, de nutrientes dissolvidos e ar, para um desempenho máximo na colheita e uma degradação ambiental mínima.

Atributos como a densidade, a porosidade, a resistência do solo à penetração e também a curva de retenção de água do solo têm sido comumente utilizados para avaliar a qualidade física do solo pela relativa facilidade de determinação e pelo baixo custo de obtenção das medidas. No entanto, a avaliação da qualidade física do solo deve integrar diferentes propriedades num reduzido número de parâmetros que expresse o ambiente físico a que as plantas são submetidas (SILVA et al., 1994). Dexter (2004a; 2004b; 2004c), propôs um índice denominado S para quantificar a qualidade física do solo, que é obtido a partir da curva de retenção da água no solo, o qual tem grande potencial de utilização em avaliações da interação manejo com a física do solo, mas ainda necessita de validações e testes em diversas condições de solo, clima, vegetação, sistemas de produção e ecossistemas. O uso do parâmetro S como um índice de qualidade física do solo vem apresentando bons resultados como em alguns trabalhos mais recentes como em Tormena e Silva (2004), Fidalski e Tormena (2007) enquanto em outros, como Tormena et al. (2008), sugere-se mais estudos para uma melhor avaliação do índice S em condições tropicais.

### 3.2 Teoria sobre o parâmetro S

O desenvolvimento teórico do parâmetro S está baseado no conceito da curva de retenção de água do solo, que representa a relação entre o teor de água e a energia com a qual ela está retida. Por isso Dexter (2004a) inicia a teoria classificando a porosidade do solo em: *Porosidade textural*, que ocorre entre as partículas de minerais primários (microporos) e *porosidade estrutural*, que compreende os bioporos e a macroestrutura (macroporos). A porosidade textural é pouco afetada pelo manejo do solo e a porosidade estrutural é sensível a fatores de manejo da cultura. 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, implementos, etc. Na Figura 1 estão representadas exemplos das curvas de retenção para três classes de texturas.

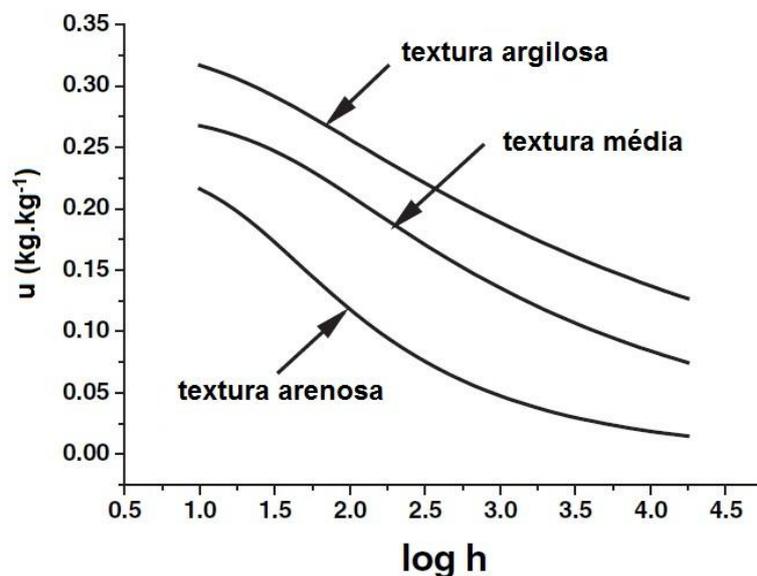


Figura 1 - Curva de retenção da água no solo para três classes de texturas (adaptado de Dexter e Czyz, 2007)

Muitos fatores interferem na capacidade de retenção de água de um solo, dentre os quais se destacam a textura, a estrutura e o conteúdo de carbono orgânico (GIAROLA et al., 2002; DEXTER et al., 2004; SEVERIANO et al., 2010). Segundo Rawls et al. (1991), a retenção de água no solo sob baixos potenciais matriciais é

decorrente do processo de capilaridade, sendo, portanto, fortemente alterada pelo arranjo das partículas do solo, devido à presença de poros estruturais (poros inter-agregados). Por outro lado, com o secamento do solo, a composição granulométrica e mineralógica assume maior importância, o que se deve à maior superfície específica para a adsorção das moléculas de água (GUPTA; LARSON, 1979; MACHADO et al., 2008).

Na construção de uma curva de retenção da água no solo, quando uma amostra do solo for drenada progressivamente da saturação, os poros maiores são esvaziados primeiramente, sendo seguido pelo esvaziamento dos poros progressivamente menores. Os poros que são drenados até o ponto de inflexão da curva de retenção, podem principalmente ser classificados como poros estruturais, enquanto os poros que perdem água abaixo do ponto de inflexão são principalmente os poros texturais (DEXTER, 2004).

O ponto de inflexão é onde a curvatura é igual a zero, ou seja, quando a curvatura muda de convexa para côncava. Assim, a inclinação da curva no ponto de inflexão é dado por  $S = \tan \omega$  (Figura 2).

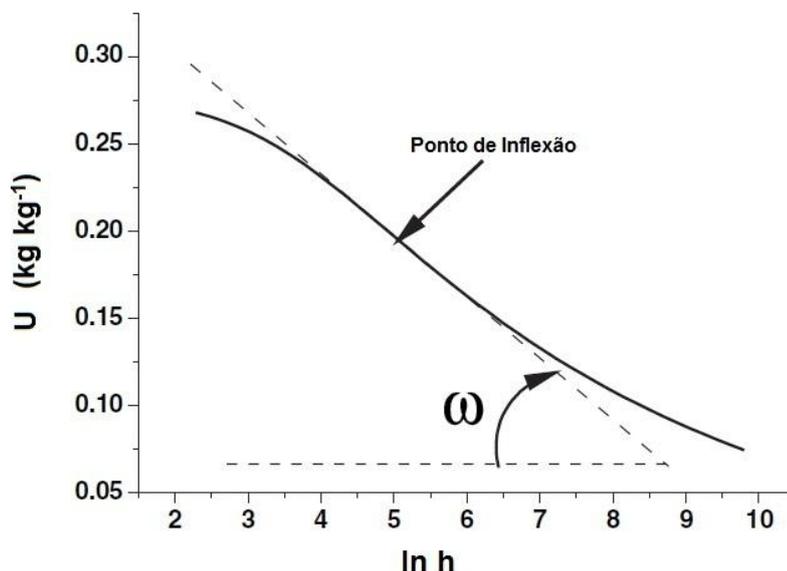


Figura 2 - O ponto de inflexão é quando a curvatura da curva de retenção da água é zero. A inclinação do ponto de inflexão é dado por  $S = \tan \omega$ . (adaptado de Dexter e Czyz, 2007)

No cálculo do S o interesse principal está na inclinação da tangente à curva de retenção da água no seu ponto de inflexão. Isto pode ser medido diretamente através da curva se existirem muitos pontos medidos com exatidão. Entretanto, é mais conveniente ajustar a curva a uma função matemática e então calcular a inclinação da tangente no ponto de inflexão em termos dos parâmetros da função.

Os pares de pontos experimentais ( $u$ ,  $h$ ) são ajustados com as equações de van Genuchten (1980) (que é dada na equação 1).

$$\theta = (\theta_{sat} - \theta_{res}) \left[ 1 + (\alpha h)^n \right]^m + \theta_{res} \quad \dots\dots\dots (1)$$

onde  $\theta_{sat}$  e  $\theta_{res}$  são a umidade na saturação e residual ( $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$ ), respectivamente;  $\theta$  e  $h$  são a umidade do solo ( $\text{cm}^3\text{cm}^{-3}$ ) e potencial da água no solo (hPa);  $\alpha$ ,  $m$  e  $n$  são parâmetros adimensionais que governam o formato da curva ajustada. Dexter e Bird (2001) demonstraram que o módulo do potencial da água no ponto de inflexão, quando é apresentado como  $\ln(h)$  versus  $\theta$  é:

$$h_i = \frac{1}{\alpha} \left[ \frac{1}{m} \right]^{\frac{1}{n}} \quad \dots\dots\dots (2)$$

Em que  $h_i$  (hPa) é o potencial da água no ponto de inflexão.

Substituindo (2) em (1) obtém-se a umidade do solo no ponto de inflexão como:

$$\theta_i = (\theta_{sat} - \theta_{res}) \left[ 1 + \frac{1}{m} \right]^{-m} + \theta_{res} \quad \dots\dots\dots (3)$$

Em que  $\theta_i$  ( $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ ) é o conteúdo de água no ponto de inflexão.

Como demonstrado por Dexter (2004a), essa equação fornece a tangente da curva de retenção de água no ponto de inflexão:

$$S = -n(\theta_{sat} - \theta_{res}) \left[ 1 + \frac{1}{m} \right]^{-(1+m)} \quad \dots\dots\dots (4)$$

A teoria desenvolvida para o cálculo do índice S apresentada por Dexter (2004a) vem da definição da curva de retenção da água no solo como a relação

entre a umidade à base de massa ( $\text{kg kg}^{-1}$ ) e o logaritmo neperiano do potencial da água no solo em hPa. Por isso nesse trabalho será utilizado em todas as equações, como convenção, o símbolo 'u' para designar a umidade do solo à base de massa.

O exame das curvas de retenção da água na literatura mostra que a degradação física do solo conduz sempre a uma mudança na forma das curvas (Figura 3). Pode-se observar especialmente, que o valor do conteúdo de água na saturação  $u_{\text{sat}}$ , torna-se menor e que a inclinação da curva de retenção no ponto de inflexão,  $S = \tan \omega$  torna-se também menor. Isto é ilustrado na Figura 3 em que a  $\tan \omega$  para solo fisicamente degradado é menor do que a  $\tan \omega$  para solo não-degradado. Uma inclinação menor corresponde ao solo desestruturado enquanto que uma inclinação maior corresponde ao solo que é estruturado e que tem muitos macroporos.

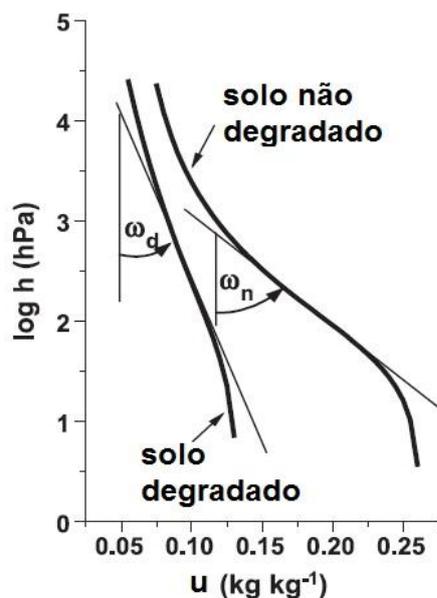


Figura 3 - Curvas de retenção de água de um mesmo solo franco areno argiloso com duas densidades do solo diferentes. A degradação física do solo ocorre quando o solo é compactado, e reduz a inclinação da curva de retenção no ponto de inflexão. Adaptado de Dexter (2004a)

Em vários trabalhos têm sido confirmada a aplicação do índice S como indicador da qualidade física do solo. Fidalski e Tormena (2007) utilizaram o índice S como uma das ferramentas para avaliar a homogeneidade da qualidade física do solo nas entrelinhas de um pomar de laranjeira com diferentes sistemas de manejo

da vegetação permanente (gramínea, leguminosa e plantas espontâneas dessecadas com herbicidas). Destacaram que a inclusão do índice S associado à distribuição do tamanho de poros permitiu melhor entendimento das alterações físicas resultantes do manejo do solo com vegetações permanentes nas entrelinhas do pomar de laranja. Andrade et al. (2009b) propuseram em seu estudo avaliar a adequação do índice S no diagnóstico da qualidade física em solos de cerrado e concluíram que este índice se correlacionou altamente com os atributos físicos como densidade, macroporosidade e porosidade total, mostrando ser um indicador adequado da qualidade física de solos de cerrado. O mesmo foi comprovado por Marchão, et al. (2007) que avaliaram o parâmetro S como indicador da qualidade física de um Latossolo Vermelho de cerrado submetido a sistema de integração lavoura-pecuária.

Pode-se dizer também que o parâmetro S é um indicador sensível da qualidade do solo, como comprovaram Silva et al. (2008) demonstrando que a área de mata nativa apresentou melhor qualidade física do solo determinada pelo índice S, em relação às áreas de plantio direto e Carvalho Filho et al. (2009) que observaram em um Latossolo Vermelho férrico um decréscimo no valor de S para solos de pastagem quando comparado ao cerrado nativo. Esse decréscimo no valor de S acompanhou também um decréscimo no valor da densidade e da porosidade do solo.

Outros autores como Tormena, et al. (2008) e Andrade et al. (2009b) também afirmam que o parâmetro S expressa os efeitos dos sistemas de manejo do solo na sua qualidade física, mas ressaltam a necessidade de estudos em diferentes solos e sistemas de manejo para uma melhor avaliação e validação do parâmetro S. Essa observação é importante pois em vários trabalhos é demonstrada a dificuldade em adequar o valor S obtido dentro da escala proposta por Dexter (2004) que sugeriu o valor de 0,035 como sendo crítico. Na maioria dos trabalhos o valor crítico encontrado parece ser superior a 0,035, como citado em Fidalski e Tormena (2007), Andrade et al. (2009b), Carvalho Filho et al. (2009), Pereira et al. (2011).

### 3.3 Modelo de Arya e Paris e o Programa Qualisolo

O modelo de Arya e Paris é caracterizado por uma abordagem físico-empírica, as propriedades dos solos são derivadas com base em alguns princípios físicos. Assim, na predição da curva de retenção de água, Arya e Paris (1981) traduziram a distribuição granulométrica em uma curva de retenção de água, através da conversão de frações de massa sólida em conteúdo de água e distribuição da porosidade em potencial hidráulico por meio da equação de capilaridade (BUDIMAN et al., 2003).

O modelo é baseado em dois conceitos. Primeiro a equação da capilaridade que relaciona o potencial mátrico ( $\psi_i$ ), com o raio do poro

$$\psi_i = \frac{2\sigma \cos \Theta}{\rho_w g r_i} \dots\dots\dots [5]$$

Onde:  $\sigma$  ( $\text{N m}^{-1}$ ) é a tensão superficial na interface ar-água,  $\Theta$  é o ângulo de contato (assumido como  $\Theta = 0$ ),  $\rho_w$  ( $\text{kg m}^{-3}$ ) a densidade da água e  $g$  ( $\text{m s}^{-2}$ ) a aceleração da gravidade. No sistema internacional de unidade (SI),  $\sigma = 0,0728 \text{ N m}^{-1}$  e  $g = 9,81 \text{ m s}^{-2}$ .

Segundo, é o cálculo do conteúdo de água a partir da distribuição do tamanho das partículas, como uma contribuição de cada fração para o molhamento do solo.

$$\theta_i = \phi \sum_{i=0}^{i=1} w_i \dots\dots\dots [6]$$

Onde:  $\phi$  ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) é a porosidade,  $w_i$  ( $\text{kg kg}^{-1}$ ) é a fração de massa, calculada por meio de uma função sigmoideal logística ajustada aos dados de distribuição de tamanhos de partículas do solo. A porosidade do solo pode ser estimada por meio da densidade do solo  $\rho_s$  ( $\text{kg m}^{-3}$ ) e das partículas  $\rho_p$  ( $\text{kg m}^{-3}$ ):  $\phi = 1 - (\rho_s / \rho_p)$ .

O raio dos poros ( $r_i$ ) é determinado através do raio das partículas ( $R_i$ ), considerando o empacotamento de partículas esféricas e um fator de escalonamento  $\alpha$ , que corrige a estimativa para solos estruturados (ARYA e PARIS, 1981; ARYA et al, 1999), por meio da equação:

$$r_i = R_i \sqrt{4en_i^{1-\alpha} / 6} \dots\dots\dots [7]$$

onde  $n_i$  é o número de partículas da classe  $i$  e  $e$  é a razão de vazios (volume de poros / volume de partículas), dado por Arya e Paris (1981):

$$n_i = \frac{3w_i}{4\pi R_i^3 \rho_p} \dots\dots\dots [8]$$

$$e = \frac{\rho_p - \rho_s}{\rho_s} \dots\dots\dots [9]$$

O potencial mátrico do solo é calculado pela combinação das equações 5, 7, 8 e 9:

$$\psi_i = \frac{2\sigma}{\rho_w g R_i \sqrt{\frac{2(\rho_p - \rho_s)}{3\rho_s} \left( \frac{3w_i}{4\pi R_i^3 \rho_p} \right)^{1-\alpha}}} \dots\dots\dots [10]$$

Uma vez conhecido o fator de escalonamento  $\alpha$ , a curva de retenção pode ser estimada pelo modelo de Arya e Paris, calculando-se a umidade pela eq. 6 e o potencial mátrico pela eq. 10, para diversas classes de diâmetros de partículas, as quais foram originalmente sugeridas por Arya e Paris (1981) como: 1, 2, 3, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 70, 100, 150, 200, 300, 400, 600, 800, 1000, 1500 e 2000  $\mu\text{m}$ .

Segundo Basile e D'Urso (1997), o modelo de Arya e Paris que é um modelo de predição da curva de retenção de água do solo a partir de dados da distribuição do tamanho da partícula, é um método bem aceito para solos com textura média, podendo ocorrer limitações para os solos argilosos. Schuh et al. (1998) avaliaram o modelo de Arya e Paris comparando-o com a curva de retenção experimental e sugeriram um valor de  $\alpha$  diferente para cada textura do solo. Dessa forma conseguiram uma melhor aproximação dos valores da curva de retenção estimada e da experimental.

O Qualisolo é um software que trabalha integrado ao sistema de transmissão de raios gama (NAIME et al., 2001) que fornece a granulometria detalhada do solo através de um arquivo de dados com valores de diâmetro e concentração de partículas. Essas informações são enviadas ao Qualisolo que juntamente com a densidade do solo, o programa aplica o modelo de Arya e Paris (1981) aos dados da granulometria e faz o ajuste da equação de van Genuchten (1980) para o cálculo de  $S$  (DEXTER, 2004a).

Além da curva da distribuição das partículas e as porcentagens de argila, silte e areia do solo, o Qualisolo fornece a curva de retenção da água, o índice  $S$

(DEXTER, 2004a),  $S$  em função da densidade do solo, faixa de umidade indicada para o manejo (DEXTER et al., 2005) e a condutividade hidráulica na umidade ótima para o manejo (DEXTER, 2004b).

Vaz et al. (2005) analisaram 104 amostras e validaram para solos brasileiros o método de Arya e Paris (1981) para obtenção da curva de retenção da água. O método Arya e Paris apresentou boa correlação com os métodos experimentais quando se tem detalhada a distribuição de tamanho de partículas (DTP), o que é difícil de obter com métodos como o da pipeta e o do densímetro. Como o analisador granulométrico mede 33 pontos da DTP, têm-se dados suficientes para gerar uma boa interpolação da DTP através de uma função sigmoideal ou logística.

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 Área de estudo

A coleta das amostras e as medidas de campo foram realizadas em uma área de uma microbacia localizada na região Central do Estado de São Paulo, Planalto de São Carlos (Planalto Ocidental Paulista/Planalto Meridional brasileiro), na borda da linha de "Cuestas" areníticas da serra Geral. Seu relevo entalhado se estende na direção sudeste e se localiza, topograficamente, na ligação da região da chamada serra do Chibarro à serra do Cuscuzeiro. Mais precisamente a área está localizada na fazenda Canchim, base do Centro de Pesquisa de Pecuária do Sudeste (CPPSE ou Embrapa Pecuária Sudeste), situada no município de São Carlos, SP, entre as coordenadas geográficas 21°55' e 22°00' Sul, 47°48' e 47°52' Oeste, e entre as cotas altimétricas 690 e 911 m, apresentando uma área de 1.465 ha (14,65 km<sup>2</sup>) (Primavezi, 1999) (Figura 4).

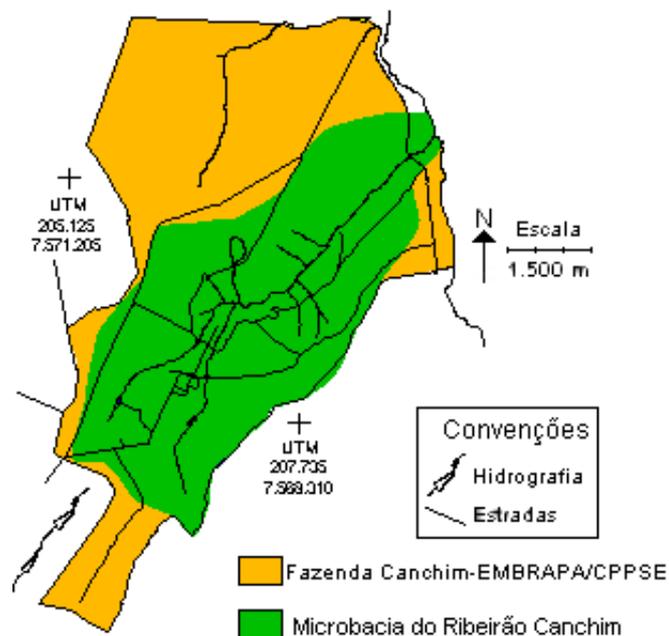


Figura 4 - Fazenda Canchim e Microbacia Hidrográfica do Ribeirão Canchim – EMBRAPA/CPPSE

O clima ocorrente é considerado como tropical de altitude, Cwa, segundo a classificação de Köppen-Geiger: quente com inverno seco e com a temperatura média do mês mais frio inferior a 18° C e do mês mais quente maior que 22°C. O total das chuvas do mês mais seco não atinge 30 mm, e o do mês mais chuvoso atinge valores superiores em dez vezes. Segundo critérios adotados por Thornthwaite, o clima seria classificado como, BB'w, mesotérmico úmido com deficiência de água no inverno (TOLENTINO, 1967). Segundo Nimer (1977) os meses secos vão de junho a agosto, embora na prática variem num período de seis meses (junho a novembro com déficit hídrico mais intenso, ou de abril a setembro considerando o período com menos chuvas).

O relevo apresenta-se plano a moderadamente ondulado (CALDERANO FILHO et al., 1998), sendo a declividade média da microbacia hidrográfica (MBH) de 3,64% (VILLELA e MATTOS, 1975). A MBH do Canchim e a fazenda Canchim apresentam os solos de maior ocorrência na região Sudeste (Figura 5), com a presença dos níveis naturais de fertilidade desde o álico até o eutrófico, passando pelo distrófico (PRIMAVEZI, 1999). A MBH do Ribeirão Canchim é ocupada por ecossistemas naturais, agrícolas e urbanizados. A coleta de solos e as medidas em campo concentraram-se nos ambientes agrícolas, que compreende as lavouras de milho, cana-de-açúcar, pastagens e eucalipto, e em ambientes naturais, conforme descrito na Tabela 1.

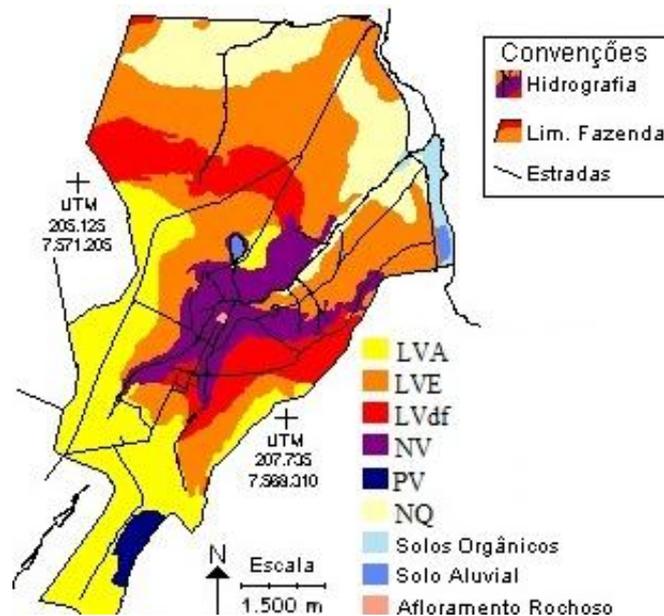


Figura 5 - Pedologia da Fazenda Canchim, Embrapa-CPPSE. LVA: Latossolo Vermelho Amarelo; LVE: Latossolo Vermelho Escuro; LVdf: Latossolo Vermelho distroférico; NV: Nitossolo Vermelho; PV: Argissolo Vermelho e NQ: Neossolo Quartzarênico

Tabela 1 - Pontos amostrados no estudo

Solo	Uso/Cobertura	Pontos
LVA	Mata	1
	Pastagem	2
	Eucalipto	3
	Milho	4
	Sorgo	5
	Cana-de-açúcar	6
LV	Mata	7
	Pastagem	8
	Millho	9
LVdf	Mata	10
	Pastagem	11
RQo	Mata	12
	Pastagem	13
NV	Mata	14
	Pastagem	15

(LVA: Latossolo Vermelho Amarelo; LV: Latossolo Vermelho; LVdf: Latossolo Vermelho distroférico; RQo: Neossolo Quartzarênico órtico; e NV: Nitossolo Vermelho)

Estas diferentes coberturas estão presentes nas principais classes de solos que compõem a área da microbacia:

### **Latossolos**

Os solos pertencentes à ordem dos Latossolos são os mais abundantes desse ambiente da MBH do Ribeirão Canchim. Essa classe compreende solos constituídos por material mineral, com horizonte B latossólico imediatamente abaixo de qualquer um dos tipos de horizonte diagnóstico superficial. Os solos dessa ordem ocupam mais de 50% do território brasileiro, constituindo, portanto, nesse aspecto, a ordem mais importante do país. São solos que apresentam elevado estágio de intemperismo e, conseqüentemente, material coloidal com baixa capacidade de trocas de cátions e baixos teores de minerais primários facilmente alteráveis. Sua reserva de nutrientes é, portanto, muito reduzida, fato que não os impedem de serem solos bastante produtivos quando bem manejados. A grande maioria dos Latossolos situa-se em relevo aplainado a suavemente ondulado. As ocorrências em relevo montanhoso são bem menos freqüentes. São solos de fácil preparo para o plantio, mesmo os argilosos, em decorrência de sua adequada consistência. As condições de relevo e a baixa erodibilidade dos solos dificultam os processos erosivos, especialmente nos solos que apresentam horizonte superficial de textura franco-argilosa ou mais fina. São, por isso, bastante utilizados para culturas extensivas. A capacidade de retenção de água dos Latossolos varia bastante em decorrência da textura, que pode ser a franco-arenosa até a muito argilosa (OLIVEIRA, 2005).

### **Neossolos**

Compreendem solos constituídos por material mineral ou orgânico pouco espesso, com pequena expressão dos processos pedogenéticos em conseqüência: 1) da baixa intensidade de atuação desses processos, que não permitiu ainda modificações expressivas do material originário; 2) de características do próprio

material, pela sua resistência ao intemperismo ou composição química; 3) do relevo, que, isoladamente ou em conjunto, impediu ou limitou a evolução desses solos (OLIVEIRA, 2005).

Cerca de 13,8% da área da MBH do Ribeirão Canchim é constituída por Neossolo Quartzarênico (PRIMAVESI et al., 1999). Estes solos, por serem muito arenosos, apresentam sérias limitações com respeito ao armazenamento de água disponível para as plantas. São exceção os Neossolos Quartzarênicos hidromórficos, nos quais o lençol freático encontra-se elevado em grande parte do ano.

Como a sua areia é constituída praticamente por quartzo, os Neossolos Quartzarênicos são solos desprovidos por completo de minerais primários alteráveis e, portanto, sem nenhuma reserva potencial de nutrientes para as plantas. Apesar disso, são bastante utilizados com reflorestamento e até com cultura canavieira, neste caso, com produções sempre aquém das obtidas em outros solos. A diminuta capacidade de adsorção desses solos implica em facilidade de perdas dos insumos aplicados, além de elevada taxa de mineralização da matéria orgânica (OLIVEIRA, 2005).

## **Nitossolos**

Compreende solos constituídos por material mineral, com horizonte B nítico, com argila de atividade baixa ou com caráter alumínico conjugado com  $CTC \geq 20$  cmol<sub>c</sub>/kg argila imediatamente abaixo do horizonte A ou dentro dos primeiros 50 cm do horizonte B. São solos de textura argilosa ou muito argilosa, estrutura em blocos subangular ou prismática muito bem desenvolvida (moderada ou forte), com superfície dos agregados reluzentes, relacionadas à cerosidade, e/ou superfícies de compressão. São por definição, solos com pequena diferença textural, o que lhes conferem, em igualdade de condições de relevo e uso, menor erodibilidade que outros solos que apresentam diferenças mais acentuadas de textura. São solos em geral profundos e, apesar de argilosos, possuem boa permeabilidade interna. A maior parte dos Nitossolos corresponde às anteriormente denominadas Terras Roxas Estruturadas, constituindo solos de grande importância agrícola

(OLIVEIRA, 2005). Na MBH do Ribeirão Canchim, os Nitossolos representam um total de 9,2% da área total, formados sobre rocha basáltica, que chega a aflorar em diferentes pontos (PRIMAVESI et al., 1999).

## 4.2 Metodologia

O estudo foi realizado em 3 etapas:

- *1ª etapa:* Estudo da estimativa do índice S pelo modelo de Arya e Paris;
- *2ª etapa:* Avaliação do índice S em escala da MB, com uma análise detalhada de 15 pontos amostrados na MBH Ribeirão Canchim, incluindo a determinação do índice S e a sua comparação com os demais parâmetros medidos;
- *3ª etapa:* Ampliação do estudo do índice S na escala da microbacia, coletando amostras indeformadas em outros locais da MBH, com uma combinação maior de solos e coberturas.

### 4.2.1 Estudo da estimativa do índice S pelo modelo de Arya e Paris

Para avaliar esta forma indireta de calcular S foi necessária a comparação entre dois procedimentos: o primeiro consistiu na estimativa do índice S pelo modelo de Arya e Paris e o Qualisolo; e o segundo foi a obtenção do índice S a partir da curva de retenção obtida pelo método experimental convencional. Os dois procedimentos foram aplicados para um banco de dados pré adquiridos constando de 111 amostras provenientes da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e da Escola Superior de Agricultura Luis de Queirós (ESALQ). Para cada amostra deste banco de dados havia registro dos valores de densidade do solo, retenção de água no solo realizado nos laboratórios de solos da ESALQ e UFRGS, granulometria detalhada e densidade global do solo. Os procedimentos de cada determinação são descritos no item 3.2.3.

#### 4.2.2 Avaliação do índice S em escala de microbacia

Nesta segunda etapa do trabalho, foram analisados em detalhe (Tabela 2) um conjunto de 15 pontos amostrais distribuídos na região da microbacia. As áreas escolhidas compreendem os solos mais encontrados na região da MBH que estão sob diversas coberturas como descrito na Tabela 1. Com os dados da curva de retenção foram obtidos os valores do índice S e correlacionados com os demais parâmetros medidos para cada solo com amostras coletadas e analisadas no laboratório ou medidas diretamente no campo, como descrito na Tabela 2.

Tabela 2 - Informações sobre parâmetros analisados e métodos utilizados.

Parâmetro	Tipo de amostra	Prof.	Nº de repetições	Equip./método	Local da análise
RP	—	0-40 cm	9	Penetrômetro de Impacto (Stolf)	Campo
Umidade volumétrica	indeformada	0-10 cm	3	Anel volumétrico	Campo
		10-30cm	3		
Retenção de água	Indeformada	0-10 cm	3	Mesa de tensão e Câmara de Richards	IAC
		10-30cm	3		
Densidade global	Indeformada	0-10 cm	3	gravimetria	Lab. de Solos Embrapa Instrum. Agrop.
		10-30cm	3		
Granulometria	Deformada -amostra composta-	0-10 cm	6	Analisador granulométrico	Embrapa Instrum. Agrop.
		10-30cm	6		
Estrutura/distrib. de poros	indeformada	0-20 cm	3	Microtomógrafo SkyScan 1172	Embrapa Instrum. Agrop.

RP: resistência à penetração (MPa)

#### 4.2.3 Ampliação do estudo do índice S na escala da microbacia

Para ampliar a validação do índice “S” na escala da microbacia, foram coletadas amostras indeformadas em outros locais da microbacia, consistindo de uma combinação maior de solos e coberturas (acrescentando 30 pontos). Nessas

amostras foram determinadas apenas granulometria, densidade do solo, umidade, resistência à penetração do solo e o índice “S” obtido indiretamente pelo modelo de Arya e Paris e o programa Qualisolo. As análises foram realizadas como descrito na Tabela 2 e no item 3.2.1.

### 4.3 Detalhamento sobre parâmetros analisados e métodos utilizados

#### 4.3.1 Curva de retenção da água no solo

A medida de retenção de água no solo foi realizada no laboratório de física do solo do Instituto Agrônomo (IAC). Os equipamentos utilizados foram a mesa de tensão e da câmara de pressão de Richards (CLAESSEN, 1997) (Figura 6), com aplicação das seguintes pressões: amostra saturada, 1, 2, 4, 8, 10, 33, 100, 500 e 1500 kPa. Foram coletadas e analisadas amostras de solo indeformado em duas profundidades para cada ponto (Tabela 2), 0-10 e 10-30 cm.



Figura 6 - Equipamentos utilizados para a determinação da curva de retenção da água no solo, no laboratório de física do solo do Instituto Agrônomo (IAC). Em (a) câmaras de pressão para extração de água em altas pressões e em (b) câmaras de pressão para a extração da água em baixas pressões.

### 4.3.2 Análise Granulométrica

Para a análise granulométrica foi utilizado o analisador granulométrico automático de raios gama (VAZ et al. 1992; OLIVEIRA et al. 1997; VAZ et al. 1999 e NAIME et al. 2001) (Figura 7), baseado na atenuação de um feixe de raios gama pelas partículas dispersas em sedimentação. As amostras compostas, coletadas em duas profundidades (Tabela 2), foram secas em estufa a temperatura de 60 °C por um período de 24 horas (EMBRAPA, 1997). Depois foram pesadas 40 g de solo e deixadas em contato com 10 ml de NaOH, 1 N, por uma noite. Após esse período passaram por um período de 16 horas, em agitação de rotação lenta (agitador tipo Wagner). As amostras agitadas foram colocadas em recipientes especiais de acrílico e introduzidas na plataforma do equipamento para análise. Para analisar um conjunto de 10 amostras o equipamento leva em média 3 horas. Os resultados foram armazenados em um arquivo de texto contendo dados de concentração e diâmetro de partícula.



Figura 7 - Sistema de transmissão de raios gama para medida da granulometria de solos.

### 4.3.3 Resistência à Penetração

Para a avaliação da resistência do solo à penetração (RP), foi utilizado o penetrômetro de impacto modelo IAA/Planalsucar-Stolf, que é constituído por um peso para provocar o impacto e uma haste e cone para a penetração no solo. A penetração da haste é obtida pelo impacto de uma massa  $m = 4$  kg, em queda livre de uma certa altura  $h$  (metros). A cada impacto são registrados os valores do deslocamento  $x$  (metros), os quais são convertidos em pressão de penetração ou

resistência à penetração (em unidades de MPa), através da equação apresentada abaixo, descrita em detalhes em Stolf (1991) e Vaz e Hopmans (2001):

$$RP = \left( \frac{Mgh}{Ax} \right) \left( \frac{M}{M+m} \right) + \frac{(M+m)}{A} g \quad \dots\dots\dots (11)$$

sendo: m (kg) a massa do corpo do penetrômetro, A (m<sup>2</sup>) a área da base do cone e g (ms<sup>-2</sup>) a aceleração da gravidade, e M=4kg a massa do cilindro que se desloca na haste.

Foram feitas medidas a uma profundidade de 0-40 cm, constituindo de 9 repetições por unidade amostral (Tabela 2).

#### 4.3.4 Umidade do solo ( $\theta$ )

A umidade volumétrica ( $\theta$ , m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>) foi obtida pela seguinte equação:

$$\theta = \frac{Va}{V} \quad \dots\dots\dots (12)$$

Em que Va é o volume de água (m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>) e V é o volume total do solo (m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>)

#### 4.3.5 Densidade do solo ( $\rho$ )

A densidade do solo foi determinada pelo método do anel volumétrico, conforme EMBRAPA (1997), o qual se fundamenta no uso de um anel de bordas cortantes com capacidade interna conhecida. A verificação da densidade do solo ocorreu no final do período de avaliação da umidade e foi calculada através da seguinte equação:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad \dots\dots\dots (13)$$

Em que  $\rho$  é a densidade do solo (g cm<sup>-3</sup>); m: massa do solo seco à 105°C por 24h (g); e V: volume do anel (cm<sup>3</sup>).

#### 4.3.6 Estrutura e Distribuição de Poros

Esses parâmetros foram avaliados através de imagens utilizando a Micro Tomografia Computadorizada (Micro-TC) (Figura 8), que permite a visualização de seções transversais (cortes internos) de um objeto de forma não destrutiva. No caso do solo é possível visualizar a estrutura interna de poros, canais, diferentes partículas e material orgânico, bem como estudar processos dinâmicos de absorção e retenção de água. O sistema de microtomografia de raios-X adquirido pela Embrapa Instrumentação Agropecuária é de fabricação da empresa belga SkyScan, modelo 1172 que é composto por um tubo de raios-X de microfoco com fonte de alta tensão (100kV), um porta-amostra com manipulador de precisão e um detector baseado em uma câmera CCD de 10Mp (4000 x 2300 pixel), conectados a um computador de controle e aquisição de dados (host) interligado em rede a um cluster de computadores utilizado na reconstrução das imagens tomográficas (LASSO et al. 2009).



Figura 8 - Microtomógrafo SkyScan 1172

Para a análise foram coletadas amostras indeformadas de solo (torrões), com 20 cm de profundidade e 20 cm de largura, para cada um dos 15 pontos. Destes blocos foram retiradas sub-amostras, em forma de torrões cilíndricos de 5 cm de altura e 2,5 cm de diâmetro, para cada bloco. Essas sub-amostras foram analisadas no

microtomógrafo com base nos seguintes parâmetros: tamanho do pixel: 14  $\mu\text{m}$ , número de *frames* para média: 15, passo de rotação: 0,3 $^\circ$ , rotação total: 360 $^\circ$  e filtro: Alumínio + cobre.

#### **4.3.7 Georeferenciamento**

Os pontos amostrados na microbacia, foram georeferenciados e a partir dos dados de latitude e longitude e com os índices e os parâmetros físicos do solo que foram determinados foram construídos mapas utilizando o software ArcView GIS versão 3.0.

#### 4.3.8 Determinação do índice S

##### *Índice “S” a partir da curva de retenção*

De acordo com o conceito teórico para obter o valor de S (DEXTER, 2004) foram utilizados umidade a base de massa, em  $\text{kg kg}^{-1}$ , e os valores de potencial mátrico, expressos em hecto Pascal, fornecidos pela retenção de água. Para o ajuste sobre esses valores de umidade e potencial foi utilizada a equação de Van Genuchten (1980) apresentada na equação 1.

Os parâmetros ( $\theta_r$ ,  $\theta_s$ ,  $\gamma$  e  $n$ ) foram obtidos pelo ajuste não-linear de mínimos quadrados (WRAITH; OR, 1998), usando a ferramenta solver do excel (Microsoft®). No ajuste foi sempre fixado o valor de  $\theta_s$  e, para  $\theta_r$ , o valor foi fixado somente nos casos em que o ajuste para esse parâmetro resultava em valores negativos ou muito próximos de zero.

A partir dos valores das variáveis  $\alpha$ ,  $n$ ,  $\theta_r$  e  $\theta_s$ , foi calculado o índice “S” utilizando a equação descrita por Dexter (2004) (equação 4)

$S > 0,035$  indica solo de boa qualidade,  $0,020 < S \leq 0,035$  solo pobre e  $S \leq 0,020$  para solo muito pobre.

### *Índice S a partir da curva de retenção estimada – modelo de Arya e Paris e Qualisolo*

A curva de retenção de água do solo foi estimada através da aplicação do modelo de Arya e Paris sobre os dados da granulometria detalhada do solo. O modelo é uma função de pedotransferência que transforma os valores de concentração e diâmetro da partícula em umidade e potencial mátrico.

A granulometria detalhada do solo pode ser obtida através de equipamentos baseados em sistema de transmissão de raios gama como o Analisador Granulométrico (VAZ et al. 1992; OLIVEIRA et al. 1997; VAZ et al. 1999 e NAIME et al. 2001) ou em equipamentos que medem a transmitância de raios X através da suspensão da amostra, como o Sedigraph (LIMA; LUZ, 2001). Neste trabalho foi utilizado o Analisador Granulométrico que trabalha em conjunto com o programa Qualisolo. Este programa utiliza o arquivo de dados obtido com o analisador granulométrico, a densidade global do solo e o melhor ajuste da equação de van Genuchten (1980), para o cálculo de S (Dexter, 2004a). É uma ferramenta importante para garantir a exatidão e a rapidez dos cálculos.

Portanto, para calcular o índice S a partir da curva de retenção estimada, foram utilizados os dados da granulometria, que enviados ao programa Qualisolo e a eles aplicado o modelo de Arya e Paris, conforme descrito no item 5.3, obteve-se a curva de retenção estimada. Após este procedimento, os dados foram ajustados pela equação de van Genuchten (1980) (equação 1)

Conhecendo os parâmetros  $\theta_r$ ,  $\theta_s$ ,  $\gamma$  e  $n$ , o programa calcula o índice S utilizando a equação descrita por Dexter (2004) (equação 4).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Estudo da estimativa do índice S pelo modelo de Arya e Paris

Para a estimativa do índice S pelo modelo de Arya e Paris usando a ferramenta Qualisolo, a metodologia foi aplicada a um banco de dados pré adquirido com 111 amostras (VAZ et al. 2005) (Figura 9). Essas amostras continham informações sobre curvas de retenção realizadas nos laboratórios de solos da ESALQ e UFRGS, densidade e granulometria detalhada (Tabela 3), possibilitando a comparação do índice S obtido pelo Qualisolo e diretamente da curva de retenção. Na Figura 10 são apresentados exemplos das curvas de retenção (CR) para solos com textura arenosa e argilosa, respectivamente, em que os parâmetros de ajuste foram utilizados para o cálculo de S.

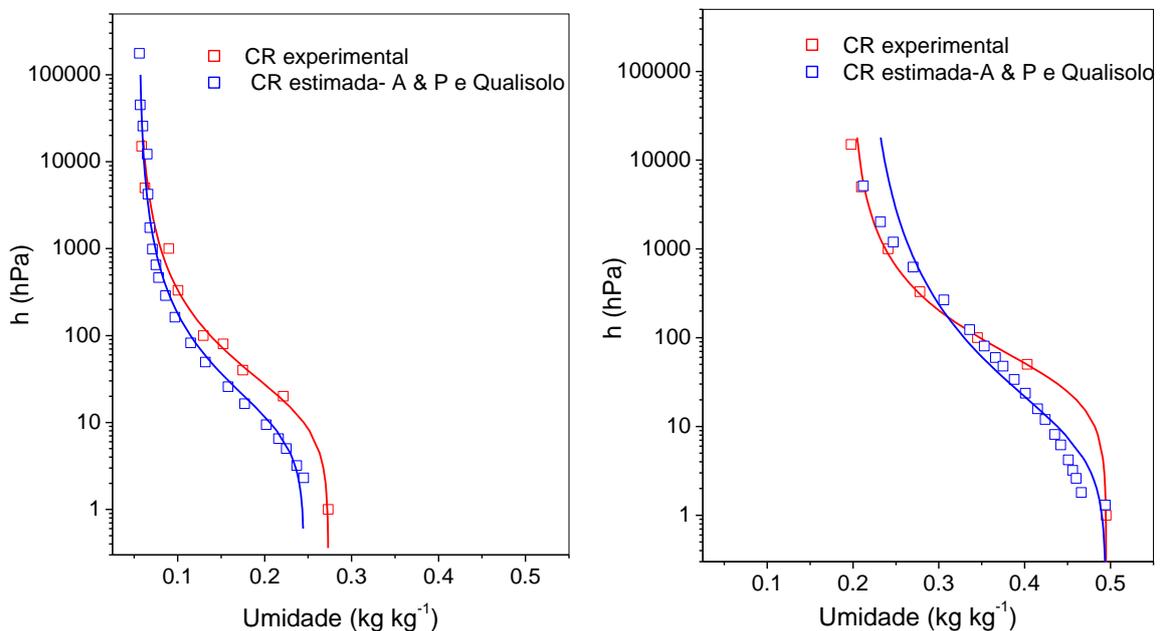


Figura 9 - Exemplos de curvas de retenção utilizadas para o cálculo do índice S, com solo de textura arenosa e argilosa, respectivamente: a) experimentalmente (vermelho) e b) *estimada* pelo modelo de Arya e Paris utilizando o *Qualisolo* (azul). As linhas contínuas representam o modelo de van Genuchten ajustados aos dados experimentais e estimados.

Tabela 3 – Média, desvio padrão (DP), valor máximo e mínimo de alguns parâmetros físicos de cada conjunto de solos usados para a estimativa da curva de retenção de água do solo.

Local da coleta	Estatística	$\rho_s$	$\rho_p^*$	$u_{330hPa}$	$u_{15000hPa}$	Argila	Silte	Areia
		— g cm <sup>-3</sup> —	—	— kg kg <sup>-1</sup> —	—	—	kg kg <sup>-1</sup> —	—
São Carlos, SP	média	1,41	2,84	0,27	0,13	0,41	0,13	0,47
	DP	0,17	0,16	0,13	0,08	0,13	0,08	0,19
	máximo	1,62	3,05	0,57	0,35	0,63	0,30	0,79
	mínimo	1,11	2,63	0,06	0,03	0,19	0,03	0,09
Rio Grande do Sul	média	1,15	2,74	0,25	0,14	0,39	0,28	0,34
	DP	0,13	0,10	0,09	0,07	0,19	0,12	0,19
	máximo	1,51	2,98	0,46	0,31	0,69	0,57	0,86
	mínimo	0,88	2,61	0,02	0,01	0,02	0,09	0,08

$\rho_s$ : densidade do solo;  $\rho_p$ : densidade das partículas;  $u_{330hPa}$ : umidade gravimétrica a 330 hPa ou 33 kPa;  $u_{15000hPa}$ : umidade gravimétrica a 15000 hPa ou 1500 kPa; \* medida estimada a partir da do coeficiente de atenuação de massa obtido na análise granulométrica (VAZ et al. 1999)

As curvas de retenção foram adquiridas da seguinte forma: *medida* experimentalmente e; *estimada* pelo modelo de Arya e Paris utilizando o programa *Qualisolo*. Na Figura 10 é apresentada a relação entre os valores do índice S calculados através do programa *Qualisolo* ( $S_{CR_{Qualisolo}}$ ) *versus* índice S calculado de forma direta, ou seja, a partir da curva de retenção experimental ( $S_{CR_{experimental}}$ ), com os dados separados nas classes arenosa (argila  $\leq 0,15$  kg kg<sup>-1</sup>), média (0,16 a 0,35 kg kg<sup>-1</sup> de argila) e argilosa (0,36 a 0,60 kg kg<sup>-1</sup> de argila).

Observa-se na Figura 10, que o coeficiente de determinação ( $r^2$ ) para todos os solos abrangendo as texturas arenosa à argilosa, é de 0,28. Esse coeficiente aumenta significativamente quando se considera apenas os solos de textura média ( $r^2=0,52$ ) e apresenta valores intermediários para solos com textura argilosa ( $r^2=0,36$ ) e arenosa ( $r^2=0,34$ ). Esses coeficientes de correlação relativamente baixos são devido à dificuldades do modelo de Arya e Paris em estabelecer modelos geométricos capazes de simular com grande exatidão a estrutura do solo e que permitam a caracterização de relações fundamentais entre partículas e espaço poroso que governam tais processos (BACCHI; REICHARDT, 1993). Nimmo (1997) afirma que modelos como Arya e Paris, muitas vezes trabalham razoavelmente bem para as texturas arenosa e média, que têm um arranjo mais aleatório de partículas, mas não apresentam o mesmo desempenho em solos com estrutura mais fina e organizada como é o caso das argilas.

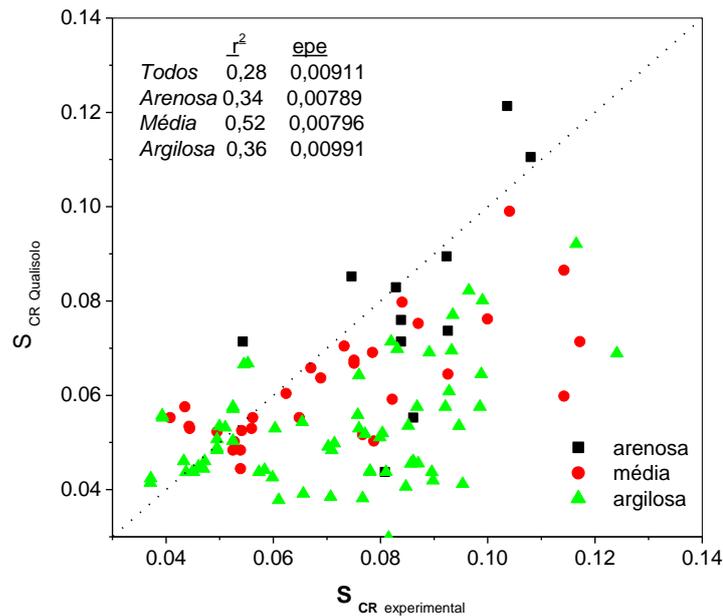


Figura 10 - Relação entre valores de índice S calculados através do programa Qualisolo ( $S_{CR_{Qualisolo}}$ ) x S calculado a partir da curva de retenção experimental ( $S_{CR_{experimental}}$ ).

O modelo de Arya e Paris usa a similaridade entre o formato das curvas de distribuição do tamanho de partículas (granulometria) e as curvas de retenção de água no solo. Não é um modelo puramente matemático, mas trata-se de um modelo semi-empírico, ou seja, com algum embasamento físico (ARYA et al., 1999). Para estimar a curva de retenção de água do solo, considera parâmetros físicos como a distribuição dos diâmetro das partículas, porosidade total e densidade do solo. Por isso, esse modelo recebe influencia direta da textura do solo. Essa característica afeta, portanto, a estimativa de S, uma vez que a teoria do índice S de Dexter está baseada na curva de retenção experimental. Rawls et al. (1991) mostraram que, em tensões baixas (menos negativas), a curva de retenção é influenciada por poros estruturais associados ao efeito da matéria orgânica na formação e na estabilidade da estrutura do solo. Em tensões altas (mais negativas), a composição granulométrica e a mineralogia do solo tornam-se mais importantes devido à superfície disponível para a adsorção de água (GUPTA; LARSON, 1979). Dessa forma, a curva de retenção de água permite relações de dependência entre os coeficientes das equações matemáticas que a descrevem com diferentes propriedades do solo, como o teor de argila, o teor de C orgânico, a área superficial específica e a densidade do solo (VAN DEN BERG et al., 1997).

Na comparação entre os métodos para o cálculo do índice S (por meio da curva de retenção estimada pelo modelo de Arya e Paris utilizando o programa Qualisolo e a curva de retenção experimental), verifica-se na Tabela 4, que  $S_{CR_{experimental}}$  apresentou uma maior variabilidade entre seus pontos ( $DP = 0,0091$ ), demonstrando ser mais sensível às variações de densidade, textura ou estrutura dos solos.

Tabela 4 - Valores referentes a moda, média, desvio padrão da média (DP), mínimo e máximo, para as 111 amostras de solo

<b>S</b>	<b>moda</b>	<b>média</b>	<b>DP</b>	<b>mínimo</b>	<b>máximo</b>
<b><math>S_{CR_{experimental}}</math></b>	0,0314	0,0314	0,0091	0,0161	0,0539
<b><math>S_{CR_{Qualisolo}}</math></b>	0,0224	0,0252	0,0068	0,0129	0,0527

Na Figura 11 observa-se o efeito da densidade no índice S. Dexter (2004), explica em seu trabalho original que quando um solo é compactado, o volume de poros é reduzido. No entanto nem todos os poros são reduzidos da mesma forma. Os poros maiores são reduzidos de tamanho e a compactação cessa quando o solo se torna forte o suficiente para resistir ao estresse aplicado a ele. Essa perda preferencial dos poros maiores tem o efeito de alterar a distribuição característica dos poros e conseqüentemente a curva de retenção de água no solo. Por isso ocorre a redução do índice S com o aumento da densidade do solo. Mas, continua explicando, que isso não é necessariamente uma regra geral, pois algumas vezes a compactação pode aumentar o número de microporos capazes de reter água e resultar em um aumento do índice S, melhorando a Qualidade Física do Solo.

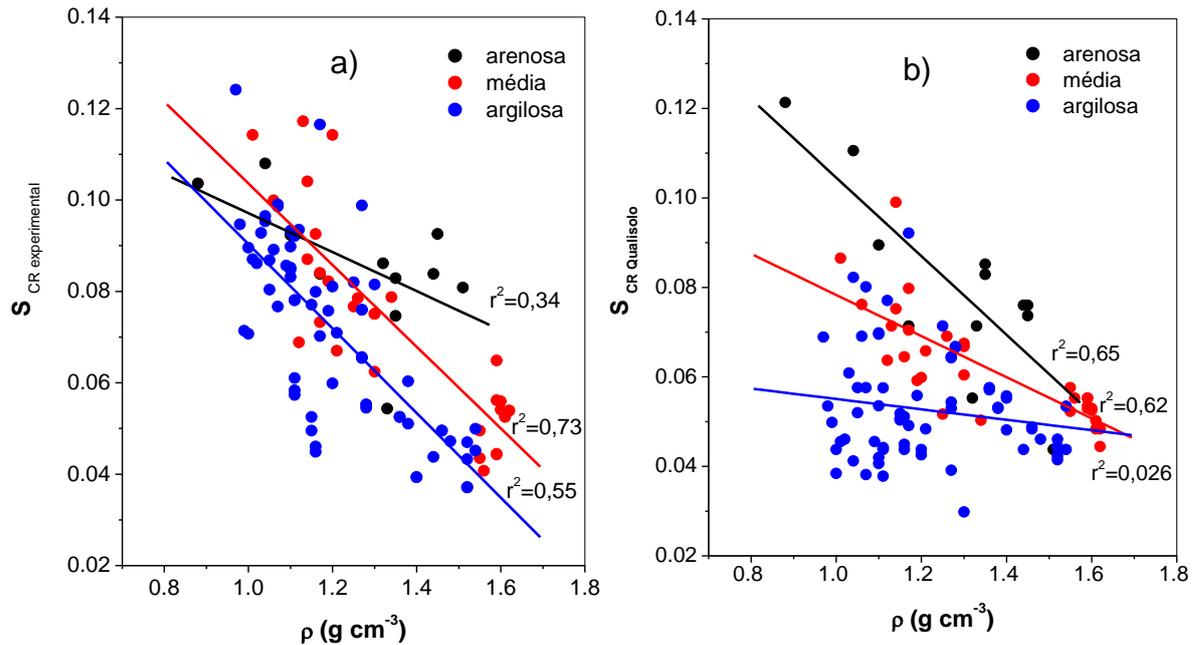


Figura 11 - Efeito da densidade e da textura nos valores de índice S calculado para as 111 amostras, a partir da curva de retenção experimental (a) e da curva de retenção estimada utilizando o programa Qualisolo (método de Arya e Paris) (b).

Verificou-se com esses resultados a mesma tendência observada por Dexter (2004), ressaltando que os solos com textura argilosas apresentaram um coeficiente de correlação para  $S_{CR\text{ Qualisolo}}$  bem inferior quando comparado a  $S_{CR\text{ experimental}}$ , confirmando a deficiência do modelo Arya e Paris para solos mais argilosos como descrito em trabalhos anteriores com a aplicação do modelo de Arya e Paris (ARYA e PARIS, 1981; BASILE e D'URSO, 1997; VAZ et al., 2005).

Separando-se os pontos experimentais da Figura 12 para cada classe (arenosa, média e argilosa) pode-se verificar melhor a variação de S com a densidade em função de uma dada textura (Figuras 12 e 13). Dexter (2004a) relacionou o índice S com o teor médio de argila de 12 classes texturais, variando de arenosa a argilosa, e observou que esse índice apresentou uma tendência de decréscimo com o incremento no teor de argila. Isso é explicável porque solos com alto teor de argila são frequentemente mais difíceis de serem manejados.

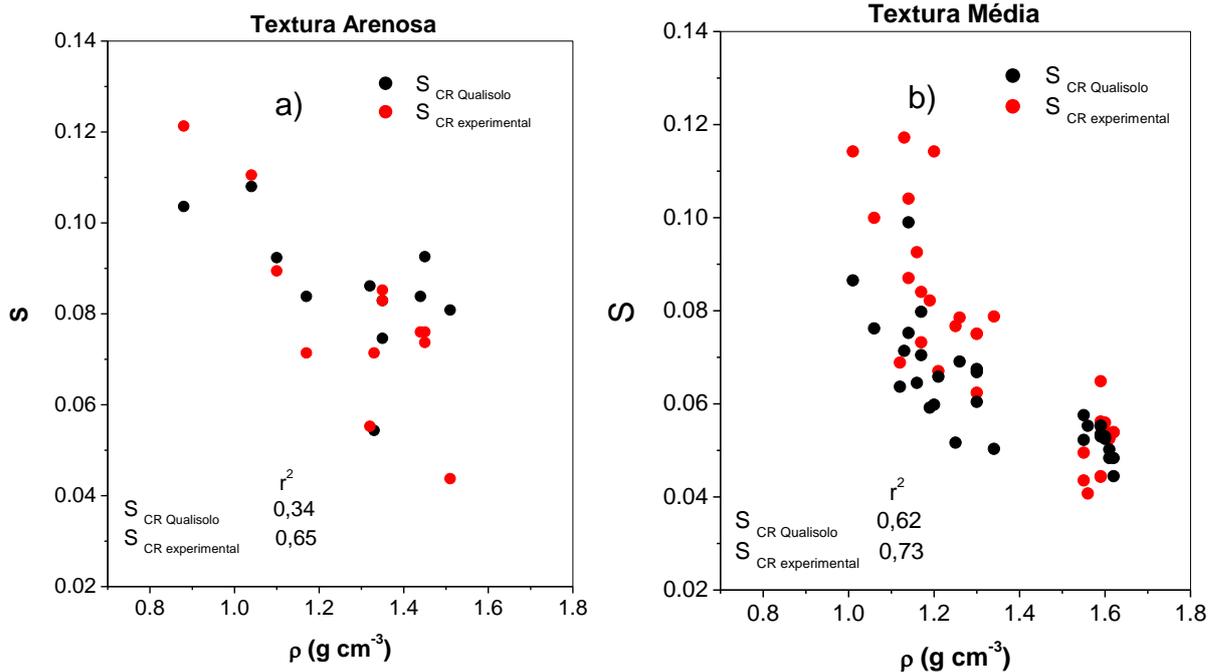


Figura 12 - Influencia da densidade no índice S para os solos arenosos (a) e de textura média (b).

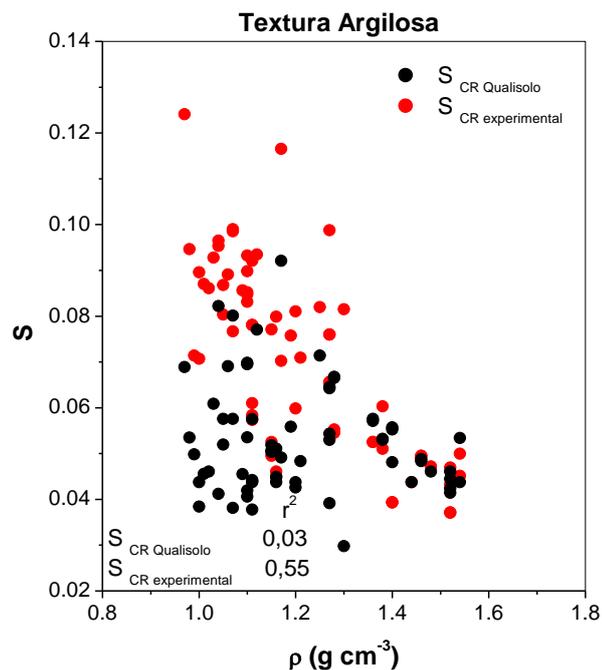


Figura 13 - Influencia de densidade no índice S para os solos de textura argilosa.

Os solos do Brasil têm variações muito grandes de densidade das partículas, que causam uma variação grande na densidade global. Assim solos arenosos em geral apresentam densidades muito maiores que solos argilosos, às vezes devido ao efeito da densidade das partículas e não só devido à textura.

## 5.2 Avaliação do índice S em escala de microbacia

### 5.2.1 Parâmetros físicos do solo

Com o objetivo de avaliar o índice S para uma escala de microbacia, foram analisados em detalhes 15 pontos amostrais da microbacia compreendendo as classes de solos mais comumente encontradas nesse ecossistema: 1) Latossolo Vermelho Amarelo (LVA), com áreas de mata, pastagem, eucalipto, milho, sorgo e cana-de-açúcar; 2) Latossolo Vermelho (LV), com coberturas de mata, pastagem e milho; 3) Latossolo Vermelho distroférico (LVdf), antigo Latossolo Roxo, com cobertura de mata e pastagem; 4) Neossolo Quartzarênico ótico (RQo): compreendendo mata e pastagem e; 5) Nitossolo Vermelho (NV), antiga Terra Roxa Estruturada, nas áreas de mata e pastagem. Para cada ponto foram feitas medidas de resistência à penetração, umidade volumétrica, densidade global, curva de retenção da água, granulometria (distribuição do tamanho de partículas), microtomografia e a determinação do índice S por duas formas diferentes: a partir da curva de retenção experimental ( $S_{CR\text{experimental}}$ ) e da curva de retenção estimada pelo modelo de Arya e Paris utilizando o programa Qualisolo ( $S_{CR\text{qualisolo}}$ ).

A Tabela 5 apresenta os valores das umidades gravimétricas na saturação ( $u_{\text{sat}}$ ), as umidades residuais ( $u_{\text{res}}$ ) (15000 hPa ou 1500 kPa), na capacidade de campo ( $u_{\text{cc}}$ ) (10 kPa ou 100 hPa) e os valores de água disponível ( $AD = u_{\text{cc}} - u_{\text{res}}$ ) ao tamanho e ao arranjo diferenciado dessas partículas (ALLEONI; CAMARGO,1997).

Tabela 5 - Umidade de saturação, umidade residual, umidade na capacidade de campo e água disponível para os 15 solos estudados.

Solo	Prof. cm	$u_{sat}$	$u_{res}$	$u_{cc}$	AD
		kg kg <sup>-1</sup>			
LVA Mata	0-10	0,54	0,16	0,22	0,06
	10-30	0,41	0,15	0,23	0,08
LVA Pastagem	0-10	0,34	0,13	0,18	0,06
	10-30	0,36	0,15	0,21	0,05
LVA Eucalipto	0-10	0,42	0,13	0,21	0,08
	10-30	0,24	0,10	0,15	0,05
LVA milho	0-10	0,25	0,10	0,17	0,08
	10-30	0,24	0,09	0,13	0,04
LVA Sorgo	0-10	0,25	0,09	0,13	0,04
	10-30	0,31	0,10	0,17	0,07
LVA Cana-de-Açúcar*	0-10	0,39	0,11	0,20	0,09
	10-30	0,40	0,12	0,20	0,08
LV Mata	0-10	0,52	0,19	0,24	0,05
	10-30	0,56	0,14	0,21	0,07
LV Pastagem	0-10	0,42	0,21	0,29	0,08
	10-30	0,42	0,21	0,28	0,07
LV Milho	0-10	0,49	0,17	0,25	0,08
	10-30	0,42	0,17	0,25	0,08
LVdf mata	0-10	0,53	0,16	0,24	0,08
	10-30	0,56	0,16	0,26	0,10
LVdf Pastagem	0-10	0,26	0,10	0,16	0,06
	10-30	0,26	0,11	0,15	0,04
NV Mata	0-10	0,47	0,16	0,20	0,05
	10-30	0,39	0,15	0,19	0,04
NV Pastagem	0-10	0,34	0,20	0,26	0,06
	10-30	0,34	0,16	0,24	0,08
NQo mata	0-10	0,34	0,09	0,15	0,06
	10-30	0,31	0,08	0,12	0,04
NQo Pastagem	0-10	0,28	0,10	0,16	0,06
	10-30	0,28	0,10	0,15	0,05

O tráfego de máquinas, equipamentos agrícolas e pisoteio de animais resultou em maiores RP e densidades para todos os solos sob pastagem e nas demais culturas avaliadas (Tabela 6), ou seja, parâmetros como a densidade e a resistência à penetração aumentam com a intensificação do uso do solo.

A resistência à penetração é um parâmetro fortemente influenciado pela densidade e umidade do solo, bem como o teor de matéria orgânica, textura e outros, mas apesar disso, Canarache (1990) sugere que valores acima de 2,5 MPa começam a restringir o pleno crescimento radicular da planta. Outros pesquisadores como Sene et al. (1985), sugerem uma diferenciação entre esse parâmetro para solos com textura arenosa (6,0 a 7,0 MPa) e textura argilosa (2,5 MPa).

Para as áreas de mata, presente nas cinco classes de solos, os valores de RP estão abaixo do sugerido por Canarache (1990). Os solos sob pastagem são os que apresentaram maiores valores de RP. A compactação em pastagens é um fato comum e pode estar associada às altas pressões exercidas pelo pisoteio de animais. Willatt e Pullar (1983) assinalaram que bois da raça Jersey podem exercer pressões de 0,2 MPa, enquanto que as pressões aplicadas nos solos por ovinos e caprinos foram de 0,08 MPa e 0,06 MPa, respectivamente. De acordo com Kondo e Dias Junior (1999), o efeito do pisoteio animal é mais pronunciado nos primeiros centímetros do solo, geralmente de 0-3 cm de profundidade. No entanto, nessas áreas, para a maioria dos solos inicia-se um incremento nos valores de RP acima dessa profundidade (Figuras 15 a 17 ).

Tabela 6 – Principais parâmetros físicos avaliados para as quinze áreas amostradas da MBH do Ribeirão Canchim.

Solo	Prof. cm	Argila kg kg <sup>-1</sup>	$\rho$	$\rho_{\max}$ g cm <sup>-3</sup>	$\rho_{\text{rel}}$	$\theta$ cm <sup>3</sup> cm <sup>-3</sup>	u kg kg <sup>-1</sup>	RP MPa
<b>LVA Mata</b>	0-10	0,25	1,00	1,74	0,57	0,21	0,21	1,0
	10-30	0,24	1,24	1,75	0,71	0,16	0,13	1,7
<b>LVA Pastagem</b>	0-10	0,25	1,42	1,74	0,81	0,20	0,14	4,5
	10-30	0,26	1,32	1,73	0,76	0,16	0,12	7,3
<b>LVA Eucalipto</b>	0-10	0,26	1,37	1,74	0,79	0,26	0,19	1,8
	10-30	0,32	1,49	1,69	0,88	0,24	0,16	3,2
<b>LVA milho</b>	0-10	0,22	1,70	1,76	0,96	0,25	0,15	1,5
	10-30	0,22	1,68	1,76	0,95	0,23	0,14	2,5
<b>LVA Sorgo</b>	0-10	0,24	1,61	1,75	0,92	0,23	0,14	1,6
	10-30	0,26	1,66	1,73	0,96	0,24	0,14	2,7
<b>LVA Cana-de-Açúcar</b>	0-10	0,19	1,36	1,78	0,76	0,23	0,17	1,0
	10-30	0,21	1,45	1,77	0,82	0,22	0,15	1,9
<b>LV Mata</b>	0-10	0,40	1,16	1,63	0,71	0,20	0,17	1,1
	10-30	0,45	1,18	1,59	0,74	0,21	0,18	2,1
<b>LV Pastagem</b>	0-10	0,38	1,28	1,64	0,78	0,28	0,22	4,4
	10-30	0,39	1,29	1,64	0,79	0,24	0,19	7,2
<b>LV Milho</b>	0-10	0,33	1,10	1,68	0,65	0,25	0,23	1,1
	10-30	0,32	1,30	1,69	0,77	0,28	0,22	3,0
<b>LVdf mata</b>	0-10	0,46	1,22	1,59	0,77	0,21	0,17	1,2
	10-30	0,47	1,07	1,58	0,68	0,21	0,20	2,5
<b>LVdf Pastagem</b>	0-10	0,33	1,64	1,68	0,98	0,25	0,15	1,3
	10-30	0,32	1,58	1,69	0,94	0,25	0,16	2,2
<b>NV Mata</b>	0-10	0,42	1,29	1,61	0,80	0,37	0,29	1,0
	10-30	0,38	1,45	1,65	0,88	0,38	0,26	1,7
<b>NV Pastagem</b>	0-10	0,70	1,37	1,41	0,97	0,22	0,16	9,8
	10-30	0,71	1,42	1,40	1,01	0,23	0,16	8,6
<b>RQo mata</b>	0-10	0,15	1,43	1,81	0,79	0,14	0,10	0,9
	10-30	0,16	1,42	1,81	0,79	0,13	0,09	1,5
<b>RQo Pastagem</b>	0-10	0,15	1,60	1,82	0,88	0,14	0,09	1,7
	10-30	0,15	1,54	1,81	0,85	0,14	0,09	2,2

$u = \theta/\rho$ ;  $\rho$ : densidade global do solo;  $\rho_{\max}$ : densidade máxima obtida com dados da literatura relacionando  $\rho_{\max}$  com teor de argila (Figura 14) e densidade relativa:  $\rho_{\text{rel}} = \rho/\rho_{\max}$ .

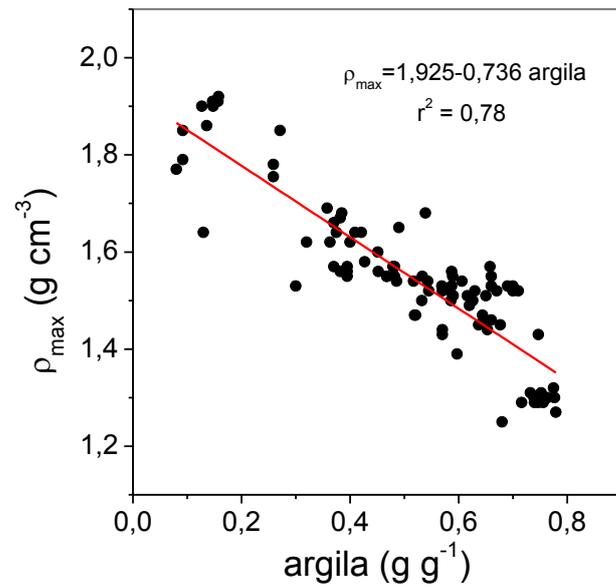


Figura 14 – Densidade máxima ( $\rho_{\max}$ ) em função do teor de argila.

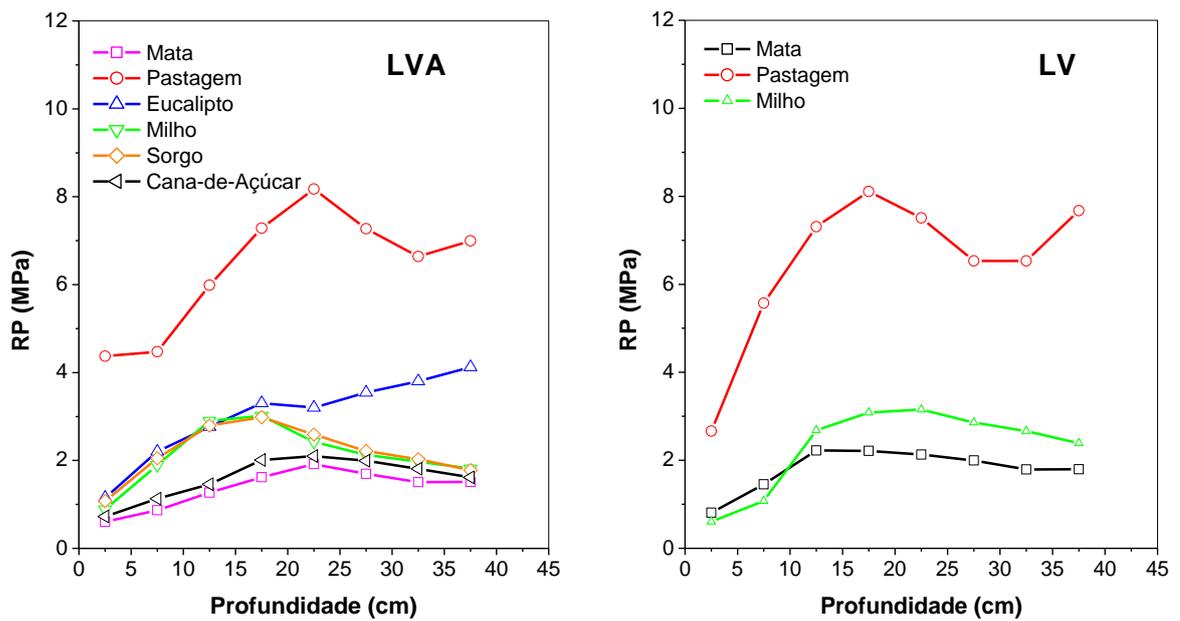


Figura 15 - Perfil da resistência à penetração (RP) de 0-40 cm, para o Latossolo Vermelho Amarelo (LVA) e para o Latossolo Vermelho (LV) sob diferentes coberturas.

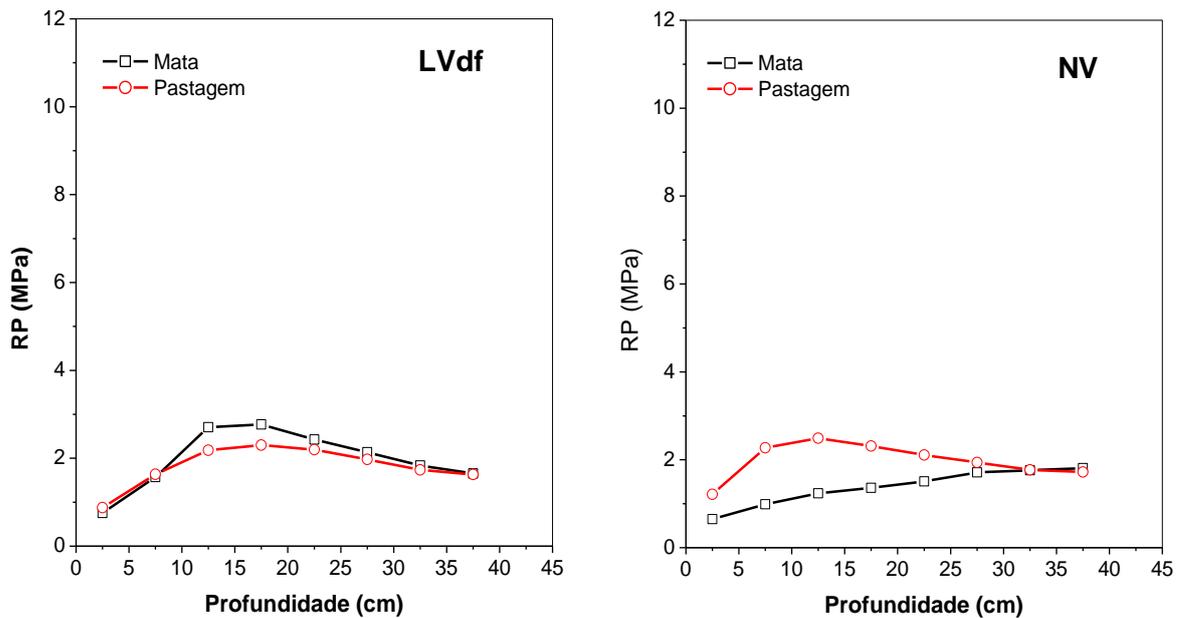


Figura 16 - Perfil da resistência à penetração (RP) de 0-40 cm, para o Latossolo Vermelho distroférico (LVdf) e Nitossolo Vermelho (NV), sob diferentes coberturas do solo.

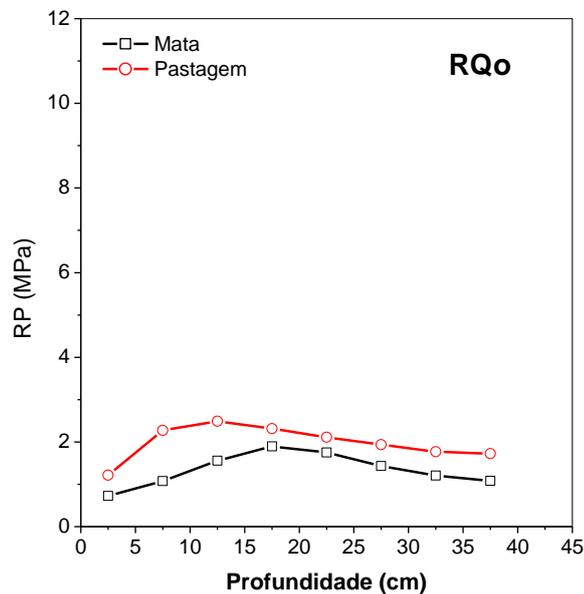


Figura 17 - Perfil da resistência à penetração (RP) de 0-40 cm, para o Neossolo Quartzarênico órtico (RQo), sob diferentes coberturas do solo.

Quando um solo está compactado, ou seja, com valores de RP acima de 2,5 MPa, é iniciada várias modificações não somente física, mas como consequência aparecem também alterações ou prejuízos de ordem química e biológica. Mas apesar da resistência à penetração e da densidade do solo ser utilizadas para

monitorar a compactação do solo, essas propriedades não podem ser diretamente utilizadas para comparar o estado de compactação de solos diferentes (ARVIDSSON e HAKANSSON, 1991; HAKANSSON e LIPIEC, 2000). A relação entre a densidade atual do solo e a densidade máxima ( $\rho_{\text{máxima}}$ ) do solo (densidade resultante da máxima compactação obtida em laboratório pelo teste de Proctor ou estimada por função de pedotransferência, como é o caso da Figura 14), tem se mostrado útil na caracterização da compactação do solo (BEUTLER et al., 2005; KLEIN, 2006; MARCOLIN e KLEIN, 2011), pois é menos influenciada pelas características dos minerais do solo e independe do tipo de granulometria do solo. O quociente dessa relação recebe o nome de densidade relativa do solo ( $\rho_{\text{relativa}}$ ).

A  $\rho_{\text{máxima}}$  dos diferentes manejos dentro de uma mesma classe de solo são muito semelhantes. Esse resultado também foi encontrado por Mentges et al. (2007), embora apresentem no campo diferentes estruturas. Apenas para o NVef e para o RQo os valores da  $\rho_{\text{máxima}}$  estavam diferentes dos demais solos, podendo ser causado pelo alto teor de argila e areia, respectivamente. A  $\rho_{\text{relativa}}$  apresenta valores semelhantes entre os manejos dos diferentes solos.

Outro importante indicador da qualidade física do solo proposto por Reynolds et al. (2002) é a porosidade no domínio dos macroporos e a porosidade da matriz do solo, equivalentes aos diâmetros de poros superiores e inferiores a 300  $\mu\text{m}$ , respectivamente. Os autores justificam o desdobramento dessas duas classes de poros, porque elas distinguem as funções de armazenamento e transmissão de água e ar. Em um solo fisicamente degradado, o diâmetro dos macroporos é reduzido, a resistência mecânica aumenta e a aeração pode tornar-se deficiente.

As Figuras 18 a 22 são as imagens de microtomografia computadorizadas (micro-TC) dos solos estudados (LVA, LV, LVdf, NV e RQo), para as seis coberturas do solo. Nessas imagens pode-se observar visualmente o efeito de cada manejo na organização da estrutura e na porosidade do solo. Nas imagens, as regiões em tom preto, são equivalentes aos espaços vazios do solo (poros) e as regiões branca representam as partículas de solo com altas densidades e alta atenuação, ou seja, provavelmente os óxidos metálicos de ferro, titânio e manganês (VAZ et al., 2011). Os tons de cinza claro indicam regiões de menor densidade, enquanto que os tons de cinza mais escuro, indicam regiões de maior densidade.

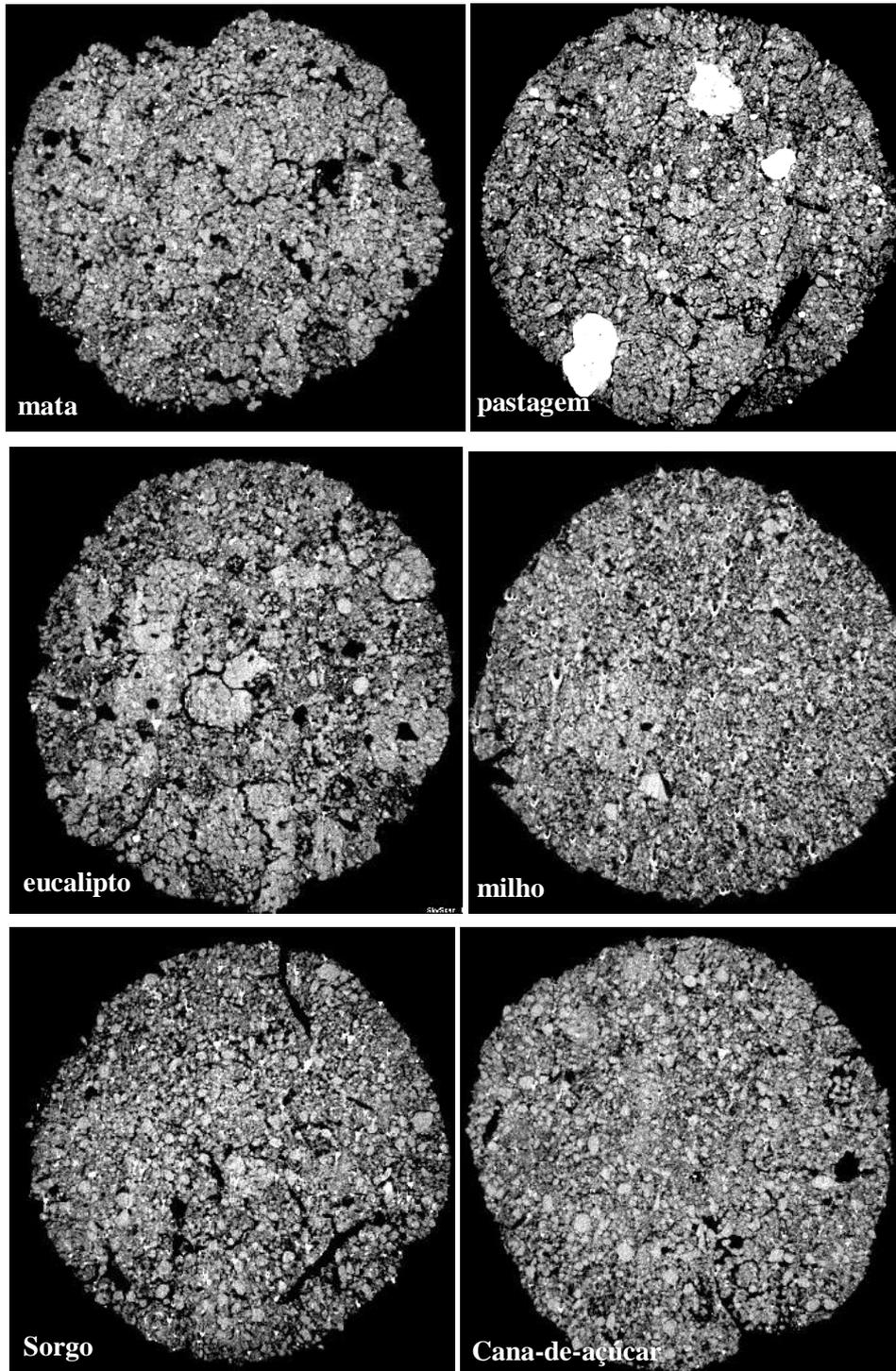


Figura 18 - Imagens de microtomografia computadorizada de amostras cilíndricas de cerca de 2 cm de diâmetro por 2 cm de altura do Latossolo Vermelho Amarelo sob área de mata pastagem, eucalipto, milho, sorgo e cana-de-açúcar (pixel da imagem de 14,8  $\mu\text{m}$ , com filtro de Al+Cu).

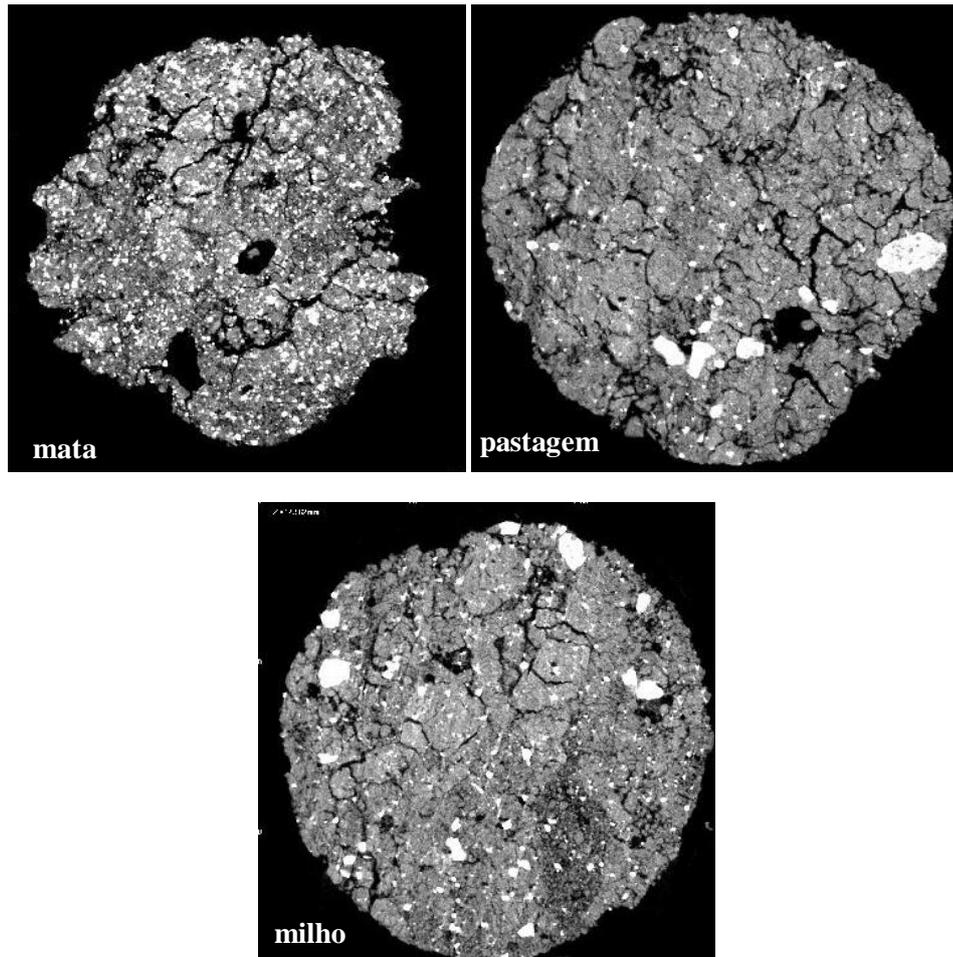


Figura 19 - Imagens de microtomografia computadorizada de amostras cilíndricas de cerca de 2 cm de diâmetro por 2 cm de altura do Latossolo Vermelho sob área de mata, pastagem e milho (pixel da imagem de 14,8  $\mu\text{m}$ , com filtro de Al+Cu).

Para todos os solos visualiza-se uma maior quantidade de espaços vazios para a mata e eucalipto devido a maior presença de matéria orgânica, agregados e ausência do trânsito de máquinas. Dessa forma observa-se uma maior diversidade de poros em relação ao tamanho quando comparado ao solo sob pastagem.

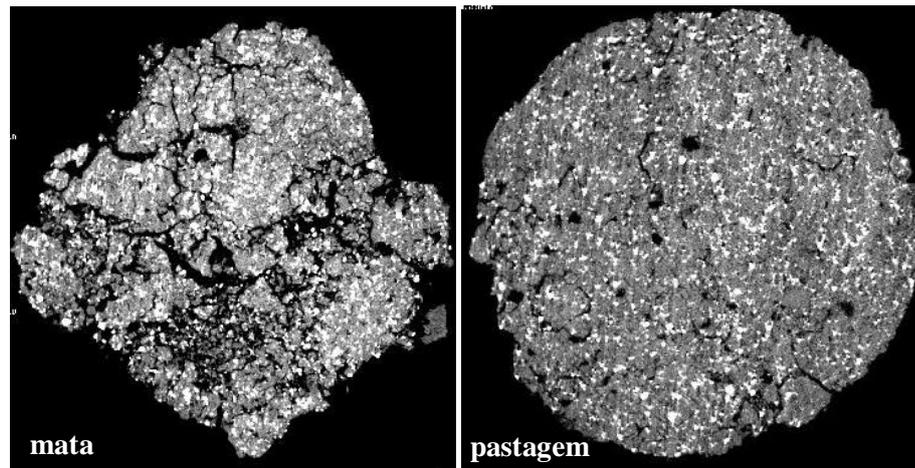


Figura 20 – Imagens de microtomografia computadorizada de amostras cilíndricas de cerca de 2 cm de diâmetro por 2 cm de altura do Latossolo Vermelho distroférico sob área de mata e pastagem, (pixel da imagem de 14,8  $\mu\text{m}$ , com filtro de Al+Cu).

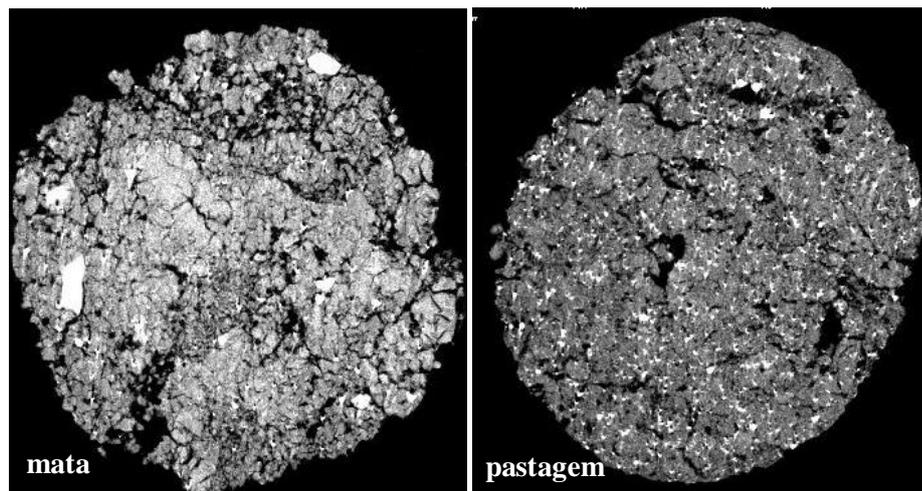


Figura 21 - Imagens de microtomografia computadorizada de amostras cilíndricas de cerca de 2 cm de diâmetro por 2 cm de altura do Nitossolo Vermelho sob área de mata e pastagem (pixel da imagem de 14,8  $\mu\text{m}$ , com filtro de Al+Cu).

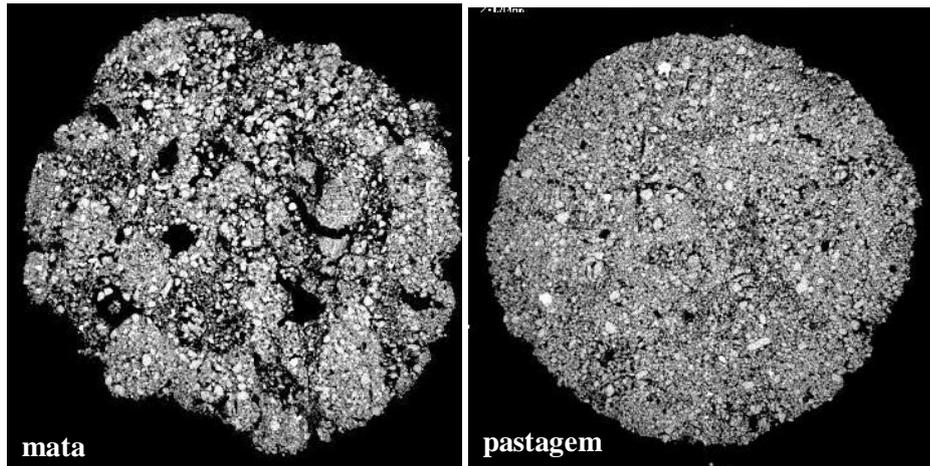


Figura 22 - Imagens de microtomografia computadorizada de amostras cilíndricas de cerca de 2 cm de diâmetro por 2 cm de altura do Neossolo Quartzarênico órtico sob área de mata e pastagem (pixel da imagem de 14,8  $\mu\text{m}$ , com filtro de Al+Cu).

Essas imagens de micro-TC feitas com tamanho do pixel de 14,8  $\mu\text{m}$ , oferecem uma resolução do dobro do seu tamanho, ou seja, de 30  $\mu\text{m}$  (STOCK, 2008). Portanto, quando falamos de porosidade em imagens com essa resolução, somente é possível avaliar os poros ou espaços vazios que possuem diâmetro igual ou acima desse valor. Segundo Camargo e Alleoni (1997), os macroporos possuem diâmetro superior a 30  $\mu\text{m}$  (potencial de aproximadamente 10 kPa), ou seja, nessas imagens foi possível quantificar através do software CTAn da SkyScan<sup>®</sup>, somente os macroporos. Essa caracterização se torna muito clara quando comparamos solos com tratamentos diferentes, como pode ser observado na Tabela 5.

A Figura 23 apresenta uma comparação entre a macroporosidade determinada pela microtomografia, a porosidade total e a macroporosidade obtida pela curva de retenção. Apesar da dispersão dos pontos, causado provavelmente pela variabilidade entre as amostras usadas para a tomografia e curva de retenção, observa-se uma tendência de correlação entre os dados da tomografia e da curva de retenção.

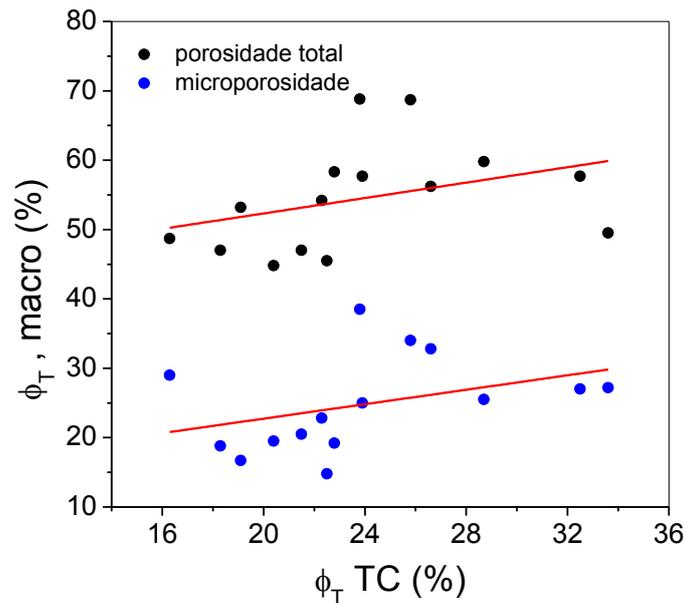


Figura 23 - Comparação entre a macroporosidade determinada pela microtomografia, a porosidade total e a macroporosidade obtida pela curva de retenção.

Tabela 7 - Comparação entre os valores em porcentagem de porosidade total obtidos por dois métodos: curva de retenção de água no solo e microtomografia computadorizada.

Solo	Cobertura	$\Phi_T$	$\Phi_T$ TC	micro	macro	$\rho$	$\rho_{relativa}$
LVA	Mata	56,2	26,6	25,6	32,8	1,12	0,64
	Pastagem	54,2	22,3	26,7	22,8	1,37	0,79
	Eucalipto	59,8	28,7	34,0	25,5	1,43	0,84
	Milho	45,5	22,5	30,8	14,8	1,69	0,96
	Sorgo	44,8	20,4	25,5	19,5	1,64	0,94
	Cana-de-Açúcar	47,0	21,5	26,7	20,5	1,41	0,79
LV	Mata	68,8	23,8	30,2	38,5	1,17	0,73
	Pastagem	58,3	22,8	39,3	19,2	1,29	0,79
	Milho	57,7	23,9	32,8	25,0	1,20	0,71
LVdf	Mata	68,7	25,8	34,7	34,0	1,15	0,73
	Pastagem	47,0	18,3	28,2	18,8	1,61	0,96
NV	Mata	57,7	32,5	31,0	27,0	1,37	0,84
	Pastagem	53,2	19,1	36,5	16,7	1,40	0,99
RQo	Mata	49,5	33,6	22,2	27,2	1,43	0,79
	Pastagem	48,7	16,3	19,7	29,0	1,57	0,87

$\Phi_T$  (%): porosidade total fornecida pela curva de retenção de água do solo;  $\Phi_T$  TC (%): porosidade total (poros acima de 30  $\mu\text{m}$ ) obtida da tomografia computadorizada; **micro e macro** ( $\text{m}^3\text{m}^{-3}$ ): microporosidade e macroporosidade fornecida pela curva de retenção de água do solo.

Nesses resultados observa-se que os valores de macroporos e de porosidade total foram menores nos solos sob pastagem em comparação com o solo sob mata. As áreas de milho e sorgo para o LVA também apresentaram valores de porosidade total bem inferiores aos demais solos, correspondendo aos maiores

valores de densidade relativa. A redução da porosidade total pode estar relacionada à redução do volume ocupado por macroporos no solo de mata em função do processo de compactação quando se inicia a implantação de uma cultura ou tráfego de animais, como atestam Assouline et al. (1997), Klein e Libardi (2002) e Araújo et al. (2004).

Através das imagens (Figuras 18 a 22), observa-se nas áreas de mata, um maior desenvolvimento dos poros estruturais (macroporos), o que resulta em menor RP e  $\rho_{relativa}$  do solo. Nas áreas de cultura e pastagem, há uma diminuição da diversidade de poros, sendo os macroporos os primeiros a serem afetados pelo processo de compactação, como também foi constatado por Lima et al. (2005).

Para Camargo e Alleoni (1997), a distribuição da porosidade total de um solo ideal para a produção agrícola deve ser de 50%, que, na capacidade de campo, teria 33,5% para a água e 16% para o ar. Normalmente, em condições de solo não saturado, os poros maiores (macroporos) são ocupados por ar e os poros menores (microporos) ocupados por água. Nesse estudo os valores de porosidade total foram, em geral, superiores a 50%, com exceção para os solos, LVA com milho (45,5%), LVA com sorgo (44,8%), LVA com cana-de-açúcar (47,0%), LVdf com pastagem (47,0%), RQo com mata (49,5%) e RQo com pastagem (48,7%) indicando uma boa porosidade para aeração, infiltração de água e qualidade física para o crescimento das plantas (BRADY e WEIL, 1999; CAMARGO e ALLEONI, 1997).

As Figuras de 24 a 26 apresentam as curvas de retenção para os 15 pontos experimentais referentes aos diferentes solos e coberturas (culturas). Os potenciais são expressos em hPa e as umidades em base de massa ( $\text{kg kg}^{-1}$ ) para facilitar a aplicação do conceito do índice S de Dexter. As linhas contínuas representam o ajuste do modelo de van Genuchten nos dados experimentais.

O efeito da degradação física do solo pode ser claramente observado na curva de retenção da água do solo em geral, como redução nos valores de umidade de saturação e da retenção dos macroporos. As diferenças observadas nos valores das umidades residuais, nas curvas de retenção (Figuras 24 a 26) em um mesmo solo e para diferentes culturas, são atribuídas provavelmente à variabilidade espacial. Apesar de serem classificados como mesmos solos, existem distâncias razoáveis entre as áreas de um determinado solo submetido à diversas coberturas, o que pode ser verificado pelas diferenças nas texturas. Constatou-se que o uso, o manejo do solo e a profundidade alteraram consideravelmente o formato e valores

das curvas de retenção de água no solo com a redução da porosidade (principalmente da macroporosidade) e como consequência a diminuição da capacidade de retenção de água. Estas alterações foram mais acentuadas na área com pastagem para a maioria dos solos e também com milho e sorgo no Latossolo Vermelho Amarelo. Carvalho Filho et. al (2009) também observaram em seu trabalho que o sistema de uso com pastagem utilizado como pastejo intensivo apresentou a menor macroporosidade do solo e conseqüentemente o menor conteúdo de água retido nas tensões de água inferiores a 20 kPa.

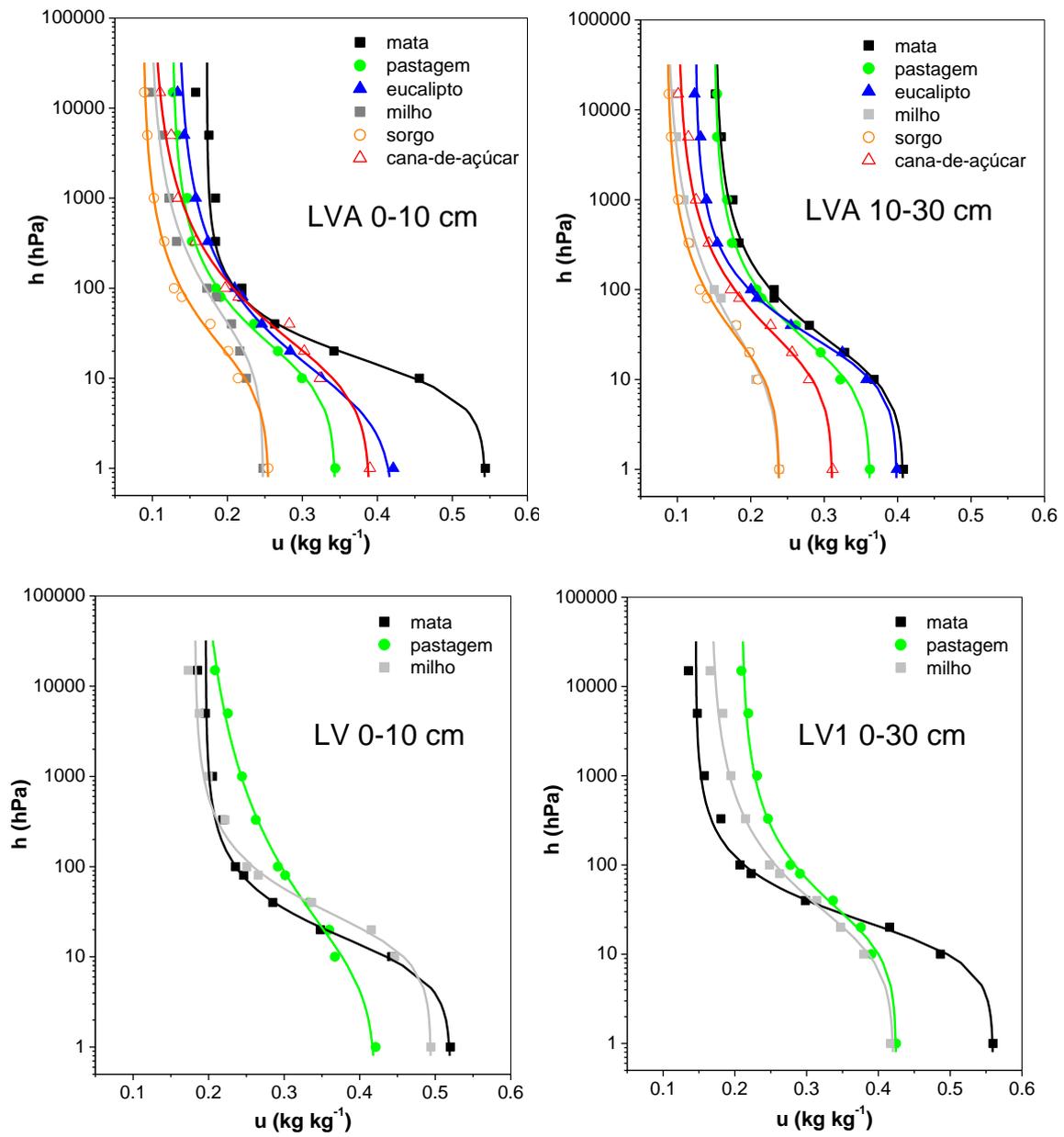


Figura 24 – curva de retenção da água nos solos LVA e LV de 0-10 e 10-30 cm, para diversas culturas.

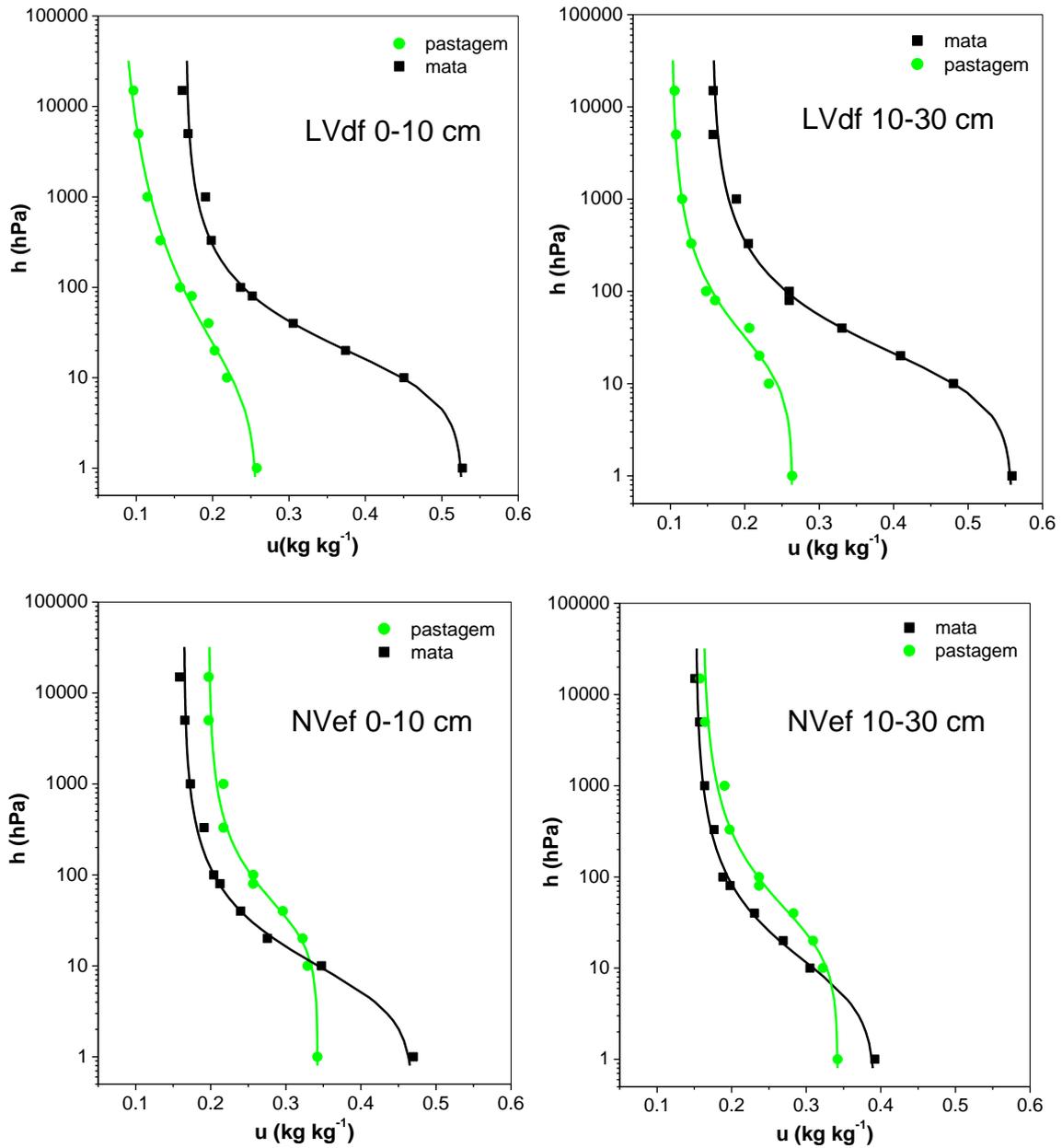


Figura 25 – Curvas de retenção da água nos solos LVdf e NVef de 0-10 e 10-30 cm, em mata e pastagem.

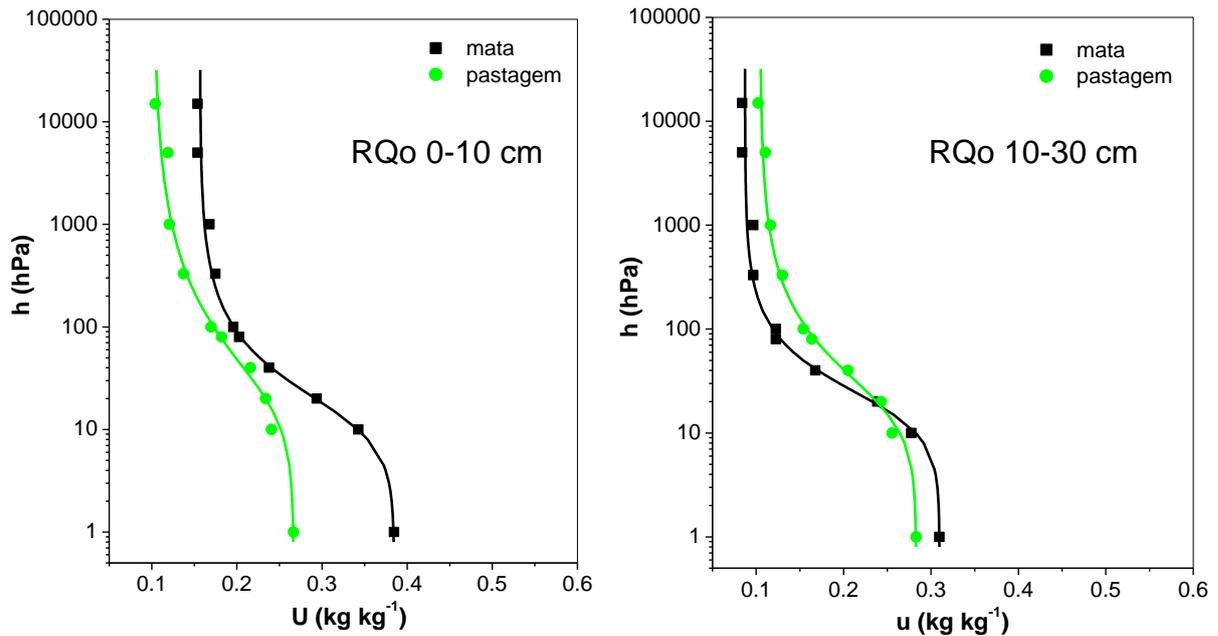


Figura 26 - Curvas de retenção da água no solo RQo de 0-10 e 10 – 30 cm, em mata e pastagem.

Em solos compactados a quantidade de água retida diminui, pois há uma diminuição da porosidade total do solo. Na Figura 24 que apresenta os seis tipos de cobertura para o LVA, destaca-se a curva de retenção para o solo de mata, com uma maior porosidade e melhor estrutura, devido a grande presença de matéria orgânica e a ausência do tráfego de máquinas. Observa-se também que em altas tensões, como também constatado por Demattê (1988) e Beutler et al. (2002), o maior teor de argila foi responsável por maior retenção de água, visto que, acima da tensão de 20 kPa ou 200 hPa, a estrutura deixa de ser relevante na retenção de água e a retenção passa a ser governada pelo efeito da textura do solo.

### 5.2.2 Índice S medido e estimado nos 15 pontos da microbacia.

Os valores do índice de qualidade física do solo (S) obtidos pela inclinação da curva de retenção de água no solo no seu ponto de inflexão diretamente na curva de retenção experimental ( $S_{CR\text{experimental}}$ ) e pela curva de retenção estimada pelo Qualissolo são ( $S_{CR\text{Qualissolo}}$ ) são apresentados na Tabela 8. Uma comparação gráfica entre os dois procedimentos de determinação de S é apresentado na (Figura 27).

Tabela 8 – Índice S obtidos com a curva de retenção experimental e estimada pelo Qualisolo para as quinze áreas estudadas da MBH.

Solo	Prof. (cm)	S	
		CRQualisolo	CRexperimental
<b>LVA Mata</b>	0-10	0.138	0.143
	10-30	0.090	0.092
<b>LVA Pastagem</b>	0-10	0.053	0.053
	10-30	0.060	0.067
<b>LVA Eucalipto</b>	0-10	0.064	0.062
	10-30	0.058	0.062
<b>LVA milho</b>	0-10	0.039	0.035
	10-30	0.044	0.037
<b>LVA Sorgo</b>	0-10	0.044	0.046
	10-30	0.039	0.044
<b>LVA Cana-de-Açúcar*</b>	0-10	0.069	0.062
	10-30	0.055	0.058
<b>LV Mata</b>	0-10	0.078	0.145
	10-30	0.071	0.131
<b>LV Pastagem</b>	0-10	0.051	0.041
	10-30	0.046	0.062
<b>LV Milho</b>	0-10	0.074	0.122
	10-30	0.058	0.062
<b>LVdf mata</b>	0-10	0.076	0.099
	10-30	0.090	0.113
<b>LVdf Pastagem</b>	0-10	0.046	0.039
	10-30	0.048	0.051
<b>NV Mata</b>	0-10	0.062	0.083
	10-30	0.053	0.060
<b>NV Pastagem</b>	0-10	0.023	0.051
	10-30	0.025	0.046
<b>RQo mata</b>	0-10	0.078	0.090
	10-30	0.076	0.090
<b>RQo Pastagem</b>	0-10	0.053	0.044
	10-30	0.058	0.053

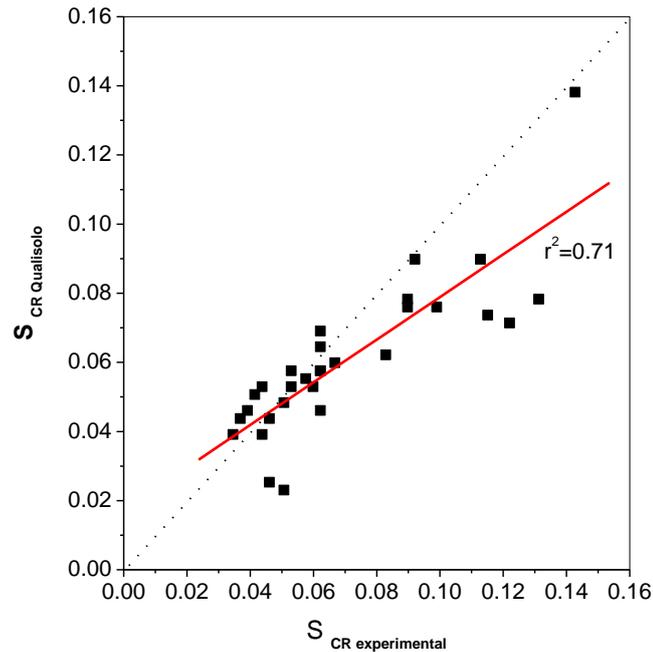


Figura 27 – Comparação entre os valores de S determinados diretamente da curva de retenção experimental ( $S_{CR\text{experimental}}$ ) e da curva estimada pelo Qualisolo ( $S_{CR\text{Qualisolo}}$ ).

Verifica-se uma boa concordância entre os dois procedimentos, principalmente para os solos mais arenosos (LVA e RQo). As maiores diferenças foram obtidas para os solos argilosos, principalmente o LV na condição de altos valores de S, ou seja, para a condição de mata, que é justamente aquela onde ocorre a maior variabilidade espacial. Assim, as diferenças de procedimentos podem ser atribuídas as dificuldades do método de Arya e Paris com solos mais argilosos e devido à maior variabilidade espacial das amostras de solos argilosos coletadas nas áreas de mata.

Em geral, observa-se que os valores de S seguem a mesma tendência dos parâmetros do solo que estão associados com a qualidade do solo, que são densidade e RP (compactação), porosidade e curva de retenção (disponibilidade de água) e a avaliação qualitativa e quantitativa das imagens de microtomografia que estão associadas com a macroporosidade. Conforme sugerido no modelo de Dexter, quanto menor o valor de S pior a qualidade física do solo. Para o LVA, o maior valor de S foi encontrado na área de mata (0,115 e 0,117), indicando que o solo tem boa qualidade física. Essa tendência pode ser confirmada pelos dados apresentados na Tabela 4, onde verifica-se um menor valor de densidade para este solo ( $1,0 \text{ g cm}^{-3}$

na profundidade de 0-10 cm e  $1,24 \text{ g cm}^{-3}$  em 10-30 cm) e menor RP 1,0 e 1,7 nas camadas de 0-10 e 10-30 cm. Os solos com as coberturas de milho e sorgo apresentaram os menores valores de S (0,041; 0,037 e 0,041; 0,044, respectivamente), concordando com os maiores valores de RP, densidade e o formato da curva de retenção que expressa a sua degradação física. Para o restante dos solos, a pastagem sempre apresentou um valor de S inferior ao solo de mata compreendendo entre 0,023 a 0,067.

A Figura 28 apresenta os valores de S para todos os solos e coberturas, nos dois procedimentos de medida utilizados. Segundo Dexter (2007) apesar de ser possível uma classificação visual do solo em relação a sua qualidade física, o índice S é importante por ser uma medida objetiva. As categorias propostas por Dexter (2004) são: solo muito bom: ( $S \geq 0,050$ ); bom: ( $0,050 > S \geq 0,035$ ); pobre: ( $0,035 > S \geq 0,020$ ) e muito pobre: ( $S \leq 0,020$ ).

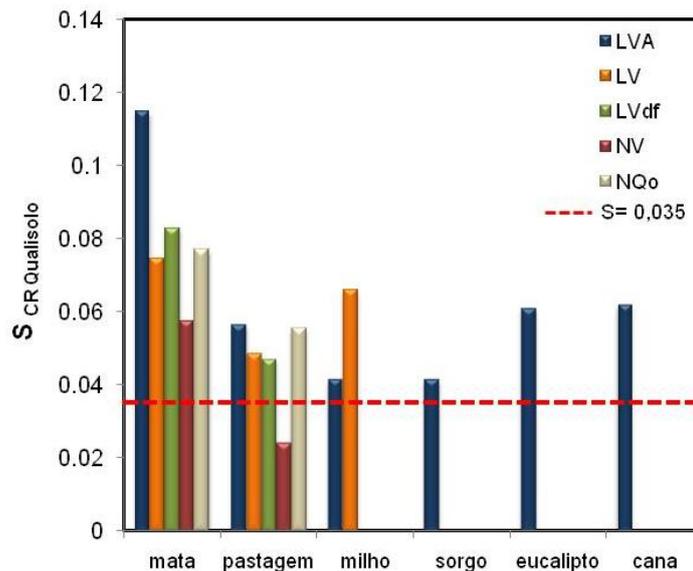


Figura 28 - Valores correspondentes de S para as 15 áreas estudadas da MBH do Ribeirão Canchim.

Verifica-se que pelo cálculo de S pela curva de retenção estimada nenhum dos solos, tanto em mata como sob cultura, apresenta valores inferiores ao limite de 0,035, que separa a condição de solo com qualidade boa e ruim. Pelo valor estimado pelo Qualisolo, apenas a condição NV pastagem é que seria considerada de qualidade pobre.

Um aspecto interessante a observar é que alguns outros trabalhos realizados com solos do Brasil também obtiveram valores de S sempre maiores que o limite de 0,035 (Dexter (2004a), como Angelotti Netto et al. (2007), Marchão et al. (2007), Beutler (2008) e Aratani et al. (2009).

A degradação física do solo evidenciada pelo aumento na densidade do solo resulta em modificações no sistema poroso com efeitos danosos às plantas. Isso decorre da redução da porosidade total do solo e da macroporosidade, reduzindo as trocas de gases entre o solo e a atmosfera e aumentando a RP, o que poderia atuar como fator limitante ao crescimento das plantas dentro da faixa de água disponível (LETEY, 1985; TOPP et al., 1994). Os solos cobertos por pastagem, milho e sorgo, apresentados nesse estudo, tiveram altas densidades, resistência à penetração e uma diminuição na retenção de água devido a compactação e a degradação física que sofreram. As porosidades total e macroporosidades também diminuíram. Portanto, essas áreas apresentam uma degradação física evidente, mas como já foi visto, os valores de S encontrados, segundo a classificação de Dexter (2004), se enquadram em solos com boa qualidade física. Carvalho Filho et al. (2009), também encontraram valores maiores de S e observaram que o valor crítico proposto por Dexter (2004), para o solo em questão, deveria ser de 0,063, uma vez que esse coincidiu com a densidade crítica do solo estudado. Andrade et al. (2009b) concluíram, com base em equações de regressão, que o valor limite de S também deveria ser maior ( $S=0,045$ ) que o valor proposto por Dexter (2004a) (que é de 0,035). Afirma que  $S=0,045$  mostra-se adequado à divisão entre solo de boa qualidade estrutural e solo com tendências a se tornar degradado, enquanto valores de  $S \leq 0,025$  indicam solos inteiramente degradados fisicamente.

Isso sugere que talvez o valor desse limiar apresentado por Dexter deve ser atualizado em função de solos com diferentes origens ou locais. Para isso uma comparação mais extensiva, considerando solos de diferentes regiões, bem como diferentes métodos de determinação da curva de retenção da água solo empregados nos diferentes trabalhos, deve ser realizada no futuro.

Isso demonstra que precisam ser realizados mais estudos para definir parâmetros condizentes com as condições dos solos tropicais com relação ao índice S. Mas ainda há uma outra problemática que é a não concordância e muitas vezes o não esclarecimento nos cálculos do parâmetro S, dificultando a comparação entre trabalhos e o uso errôneo da escala de parâmetros proposto por Dexter (2004).

A teoria desenvolvida para obter o valor  $S$  apresentada por Dexter (2004a), vem da definição da curva de retenção de água como a relação entre a umidade gravimétrica ( $\text{kg kg}^{-1}$ ) e o logaritmo (base  $e$ ) do potencial de água do solo em hPa. Em alguns trabalhos, o parâmetro  $S$  tem sido calculado em umidade volumétrica (FIDALSKI e TORMENA, 2007), ou com potencial em kPa (ANDRADE e STONE 2009b), cm de água (FIDALSKI e TORMENA, 2007), MPa (CARVALHO FILHO, 2009). Ou ainda, em alguns casos, as unidades não são mencionadas nos trabalhos, pressupondo-se que sejam as mesmas usadas para a função de van Genuchten (1980), como acontece em Marchão et al. (2007), Freddi et al. (2009). A questão está nas unidades em que são plotados os dados, pois a escala influencia o formato da curva e também desloca a sua posição nos eixos, gerando parâmetros de ajustes diferentes e conseqüentemente valores de  $S$  diferentes. Quando se faz uso de unidades distintas daquelas definidas por Dexter (2004a) não se pode utilizar os limiares propostos no modelo original.

Entretanto, independente dos valores absolutos obtidos, comparados com o limiar, a avaliação comparativa entre os solos e sistemas de cultivo, bem como a comparação do índice com propriedades físicas do solo associadas com qualidade (densidade, porosidade, RP, curva de retenção e outras) em um dado trabalho fornece informações bastante úteis dos aspectos da qualidade física do solo. Para tanto, a seguir os valores de  $S$  são correlacionados com os diversos parâmetros físicos medidos neste trabalho.

A Figura 29 apresenta a correlação entre os valores de  $S$  com a densidade global do solo ( $\rho$ ) e a densidade relativizada pela densidade máxima obtida pelo teste de Proctor ( $\rho_{\text{max}}$ ). De acordo com Andrade e Stone (2009), o índice  $S$  é altamente correlacionado com a densidade do solo, porosidade total e macroporosidade, mostrando tratar-se de um indicador adequado da qualidade física do solo. Pode-se observar que quanto maior a densidade global ou relativa, maior é o índice  $S$  e que houve um aumento significativo no coeficiente de determinação ( $r^2$ ) quando  $S$  foi correlacionado com  $\rho_{\text{relativa}}$  no caso de  $S_{\text{CRqualisolo}}$ . Valores de  $\rho_{\text{relativa}}$  acima de 0,86 são considerados elevados e prejudiciais ao desenvolvimento das culturas e abaixo de 0,80 podem afetar a produtividade de alguns cereais em conseqüência da redução da capacidade de armazenamento de água no solo (LINDSTRON e VOORHEES, 1994). Segundo ARVIDSSON e HAKANSSON (1991), em geral, na  $\rho_{\text{relativa}}$  de 0,86 são obtidas maiores produtividades, oscilando com as

condições climáticas e culturas, sendo os resultados similares para os diferentes solos.

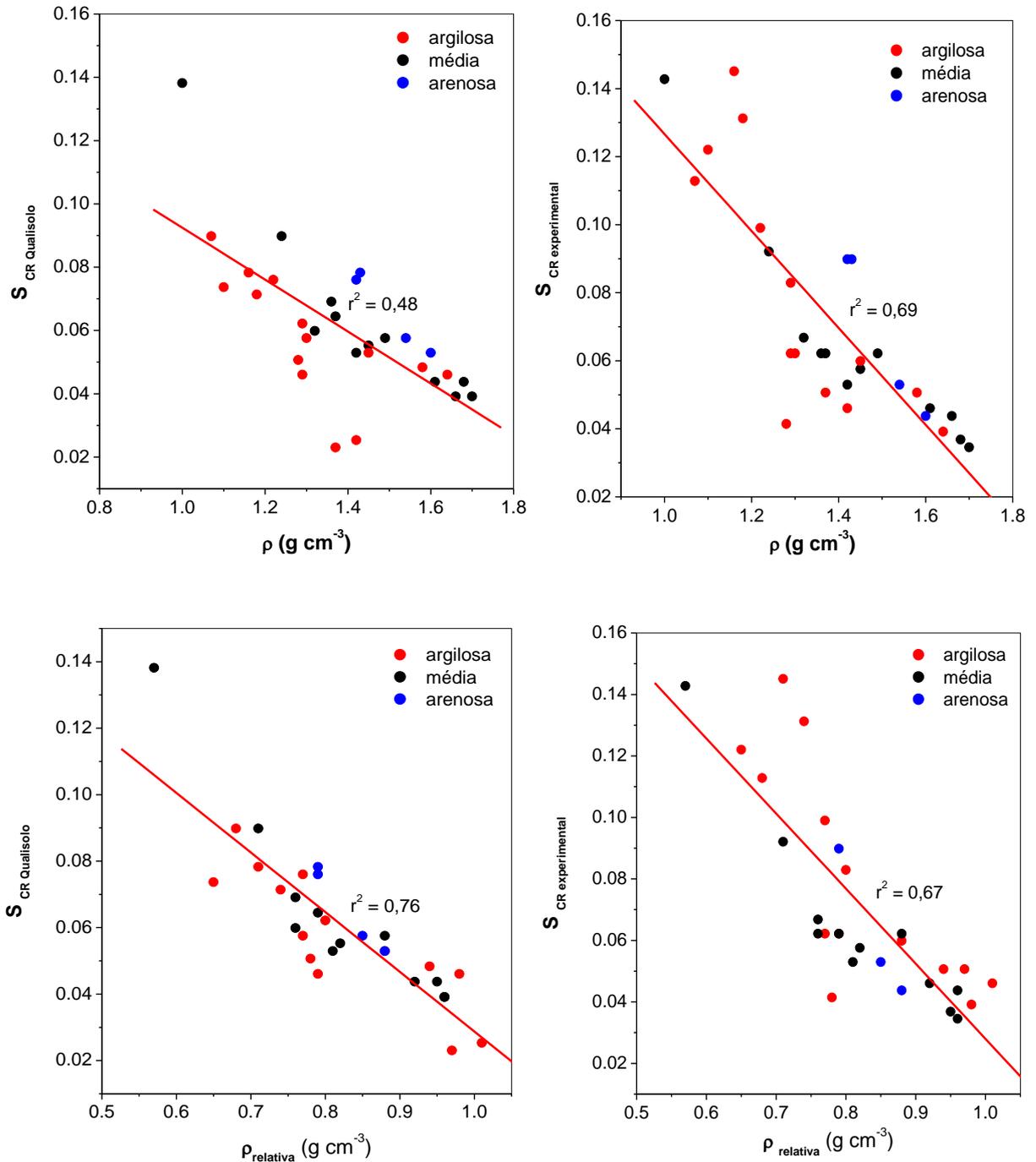


Figura 29 - Correlação entre os valores do índice S calculado a partir da curva de retenção estimada pelo modelo de Arya e Paris ( $S_{\text{CR qualisolo}}$ ) e experimental ( $S_{\text{CR experimental}}$ ) versus densidade global do solo ( $\rho$ ) e densidade relativa, para os principais solos encontrados na MBH do Ribeirão Canchim.

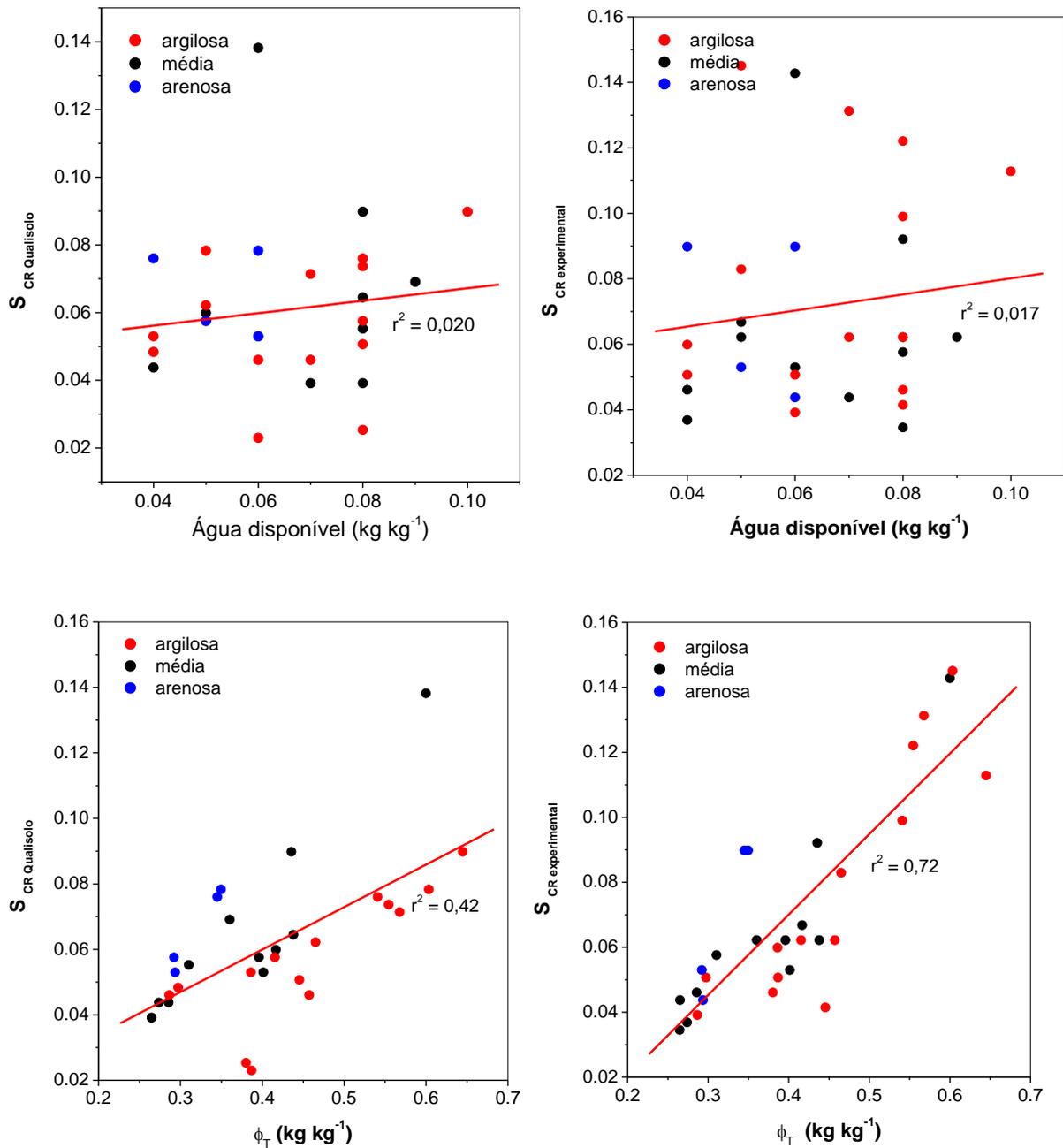


Figura 30 - Correlação entre os valores do índice S calculado a partir da curva de retenção estimada pelo modelo de Arya e Paris ( $S_{CR\ Qualisolo}$ ) e experimental ( $S_{CR\ experimental}$ ) versus água disponível e porosidade total obtida da curva de retenção, para os principais solos encontrados na MBH do Ribeirão Canchim.

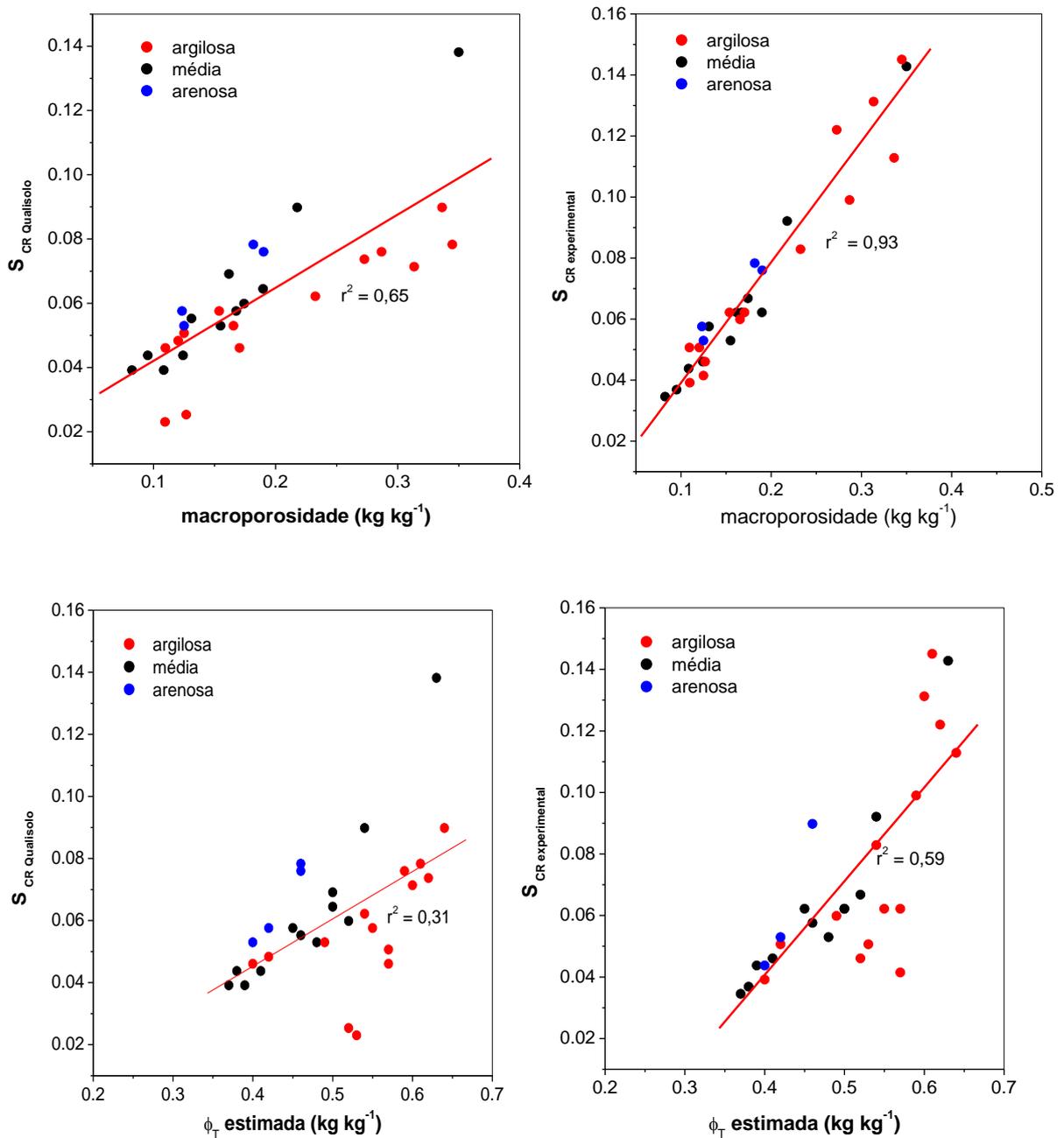


Figura 31 - Correlação entre os valores do índice S calculado a partir da curva de retenção estimada pelo modelo de Arya e Paris ( $S_{CR\text{Qualisolo}}$ ) e experimental ( $S_{CR\text{experimental}}$ ) versus macroporosidade, obtida da curva de retenção e porosidade estimada, para os principais solos encontrados na MBH do Ribeirão Canchim.

Com as equações de regressão obtidas da correlação entre  $S_{CR\text{Qualisolo}}$  ( $S_{CR\text{Qualisolo}} = -0,1794 \rho_{\text{relativa}} + 0,2082$ ) e  $S_{CR\text{experimental}}$  ( $S_{CR\text{experimental}} = -0,2442 \rho_{\text{relativa}} + 0,2722$ ) versus densidade relativa, foram empregados o valor de  $\rho_{\text{relativa}}$  de 0,86 para determinar um valor de S crítico para os solos estudados. Obteve-se dessa forma, um valor crítico de 0,054 para  $S_{CR\text{Qualisolo}}$  e de 0,062 para  $S_{CR\text{experimental}}$ .

O índice S correlacionou-se significativamente com todos os atributos físicos do solo avaliados (Figuras 29 a 32) com exceção da água disponível que apresentou uma alta dispersão dos pontos. As funções de regressão entre os atributos físicos em função de S ajustaram-se relativamente bem ao modelo linear. Assim, com o aumento da macroporosidade e da porosidade total, houve correlação positiva em relação ao índice S. Com o aumento da densidade do solo e da densidade relativa, correlações negativas foram observadas, concordando com Stone et al. (2005), Dexter (2004a) e Aratani et al. (2009). Verificou-se que o maior coeficiente de determinação foi encontrado para a macroporosidade, corroborando com Stone et al. (2005) e Aratani et al. (2009).

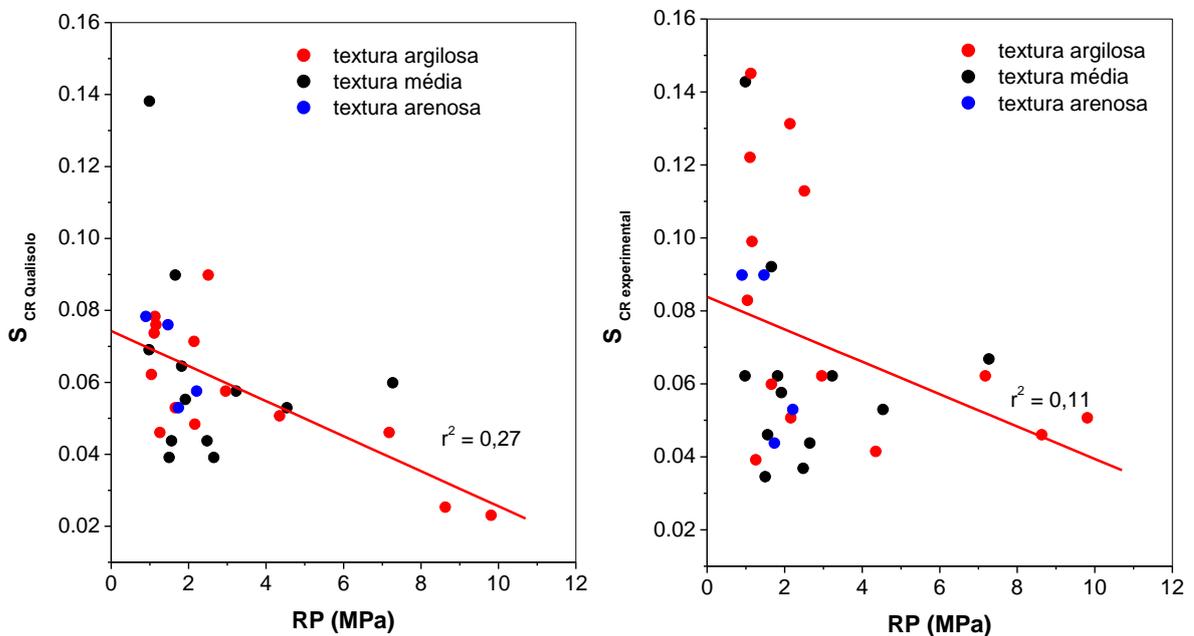


Figura 32 - Correlação entre os valores do índice S e de resistência à penetração (RP) em MPa para os principais solos encontrados na MBH do Ribeirão Canchim: Latossolo Vermelho Amarelo, Latossolo Vermelho, Latossolo Vermelho distroférico, Nitossolo Vermelho e Neossolo Quartzarênico sob diferentes coberturas.

O índice S responde às variações na densidade e RP. Quanto maior a densidade e a RP do solo, menor será o índice S. Para o LVA, por exemplo, na área de pastagem, resultou em uma RP de 5,9 MPa (valor médio de 0-40 cm) e conseqüentemente um índice  $S_{CRQualisolo}$  igual a 0,057. No entanto, em alguns casos, observa-se inconsistências entre os valores de S e de RP, como no caso do solo LVA em área de mata, onde a RP foi baixa (1,4 MPa, média de 0-40 cm) e o valor de  $S_{CRQualisolo}$  foi de 0,115, ou seja, muito alto com relação a escala de Dexter. Essas inconsistências pontuais podem ser explicadas por vários aspectos, como por

exemplo a própria dificuldade do parâmetro avaliado (no caso a RP) de fornecer dados consistentes para a avaliação da qualidade do solo. Deve-se lembrar que a RP é altamente afetada pela umidade do solo, por exemplo. Assim, a idéia dessa abordagem é de se avaliar as tendências gerais de correlações de S com os parâmetros físicos do solo, para se avançar no entendimento dos índices de qualidade do solo, como é o caso do índice S, com outros parâmetros que também são usados para esse fim.

### **5.3 Ampliação do estudo do índice S em escala de microbacia**

Foram avaliados 30 pontos aleatoriamente e coletadas amostras para granulometria detalhada, amostra indeformada para densidade e umidade, medidas de resistência à penetração e a determinação do índice S através da curva de retenção estimada pelo modelo de Arya e Paris, com a finalidade de caracterizar a área da MBH com relação à sua qualidade física. Os resultados dessas determinações estão na Tabela 9.

Tabela 9 - Valores médios de argila do solo ( $\text{kg kg}^{-1}$ ),  $\rho$  ( $\text{g cm}^{-3}$ ),  $\rho_{\text{maxima}}$  ( $\text{g cm}^{-3}$ ),  $\rho_{\text{relativa}}$  ( $\text{g cm}^{-3}$ ),  $u$  ( $\text{kg kg}^{-1}$ ) e RP (MPa) dos trinta pontos amostrados na MBH do Ribeirão Canchim.

solo	cobertura	prof. cm	Argila $\text{kg kg}^{-1}$	$\rho$	$\rho_{\text{maxima}}$	$\rho_{\text{relativa}}$	$u$ $\text{kg kg}^{-1}$	RP MPa	$S_{\text{CRqualisolo}}$	
				$\text{g cm}^{-3}$						
LV	mata	0-10	0,30	1,33	1,70	0,78	0,11	0,9	0,091	
		10-30	0,33	1,39	1,68	0,83	0,11	1,5	0,080	
	pastagem	0-10	0,48	1,04	1,57	0,66	0,35	2,6	0,064	
		10-30	0,43	1,08	1,61	0,67	0,32	3,8	0,060	
	pastagem	0-10	0,39	1,40	1,64	0,86	0,06	4,3	0,065	
		10-30	0,42	1,46	1,62	0,90	0,07	4,9	0,056	
	pastagem	0-10	0,45	1,19	1,59	0,75	0,40	2,0	0,053	
		10-30	0,47	1,17	1,58	0,74	0,38	2,5	0,053	
	pastagem	0-10	0,40	1,49	1,63	0,91	0,18	2,7	0,054	
		10-30	0,42	1,54	1,62	0,95	0,15	4,5	0,044	
	mata	0-10	0,41	1,12	1,63	0,69	0,17	1,6	0,090	
		10-30	0,42	1,17	1,61	0,73	0,16	2,8	0,078	
	pastagem	0-10	0,37	1,09	1,65	0,66	0,25	5,8	0,091	
		10-30	0,37	1,17	1,65	0,71	0,24	8,7	0,067	
	pastagem	0-10	0,38	1,14	1,65	0,69	0,23	7,2	0,061	
		10-30	0,42	0,92	1,62	0,57	0,23	6,9	0,087	
	pastagem	0-10	0,44	1,15	1,60	0,72	0,21	5,6	0,061	
		10-30	0,48	1,12	1,57	0,71	0,21	7,4	0,047	
	LVA	pastagem	0-10	0,30	1,44	1,70	0,84	0,10	10,4	0,059
			10-30	0,34	1,47	1,67	0,88	0,10	10,5	0,065
pastagem		0-10	0,45	1,39	1,59	0,87	0,12	12,2	0,056	
		10-30	0,40	1,34	1,63	0,82	0,14	12,4	0,063	
pastagem		0-10	0,39	1,43	1,64	0,87	0,07	9,8	0,055	
		10-30	0,37	1,38	1,65	0,84	0,08	9,8	0,061	
feijão		0-10	0,16	1,52	1,81	0,84	0,12	1,5	0,066	
		10-30	0,17	1,48	1,80	0,82	0,13	2,6	0,051	
cana-de-açúcar		0-10	0,19	1,51	1,79	0,85	0,13	3,4	0,061	
		10-30	0,18	1,5	1,79	0,84	0,14	4,1	0,068	
sorgo		0-10	0,40	1,29	1,63	0,79	0,09	7,7	0,075	
		10-30	0,38	1,4	1,65	0,85	0,10	14,3	0,061	

(continua...)

(conclusão)

solo	cobertura	prof. cm	Argila kg kg <sup>-1</sup>	$\rho$	$\rho_{\text{maxima}}$	$\rho_{\text{relativa}}$	u kg kg <sup>-1</sup>	RP MPa	$S_{\text{CRQualisolo}}$
				g cm <sup>-3</sup>					
LVA	seringueira	0-10	0,22	1,26	1,76	0,71	0,11	1,6	0,101
		10-30	0,25	1,27	1,74	0,73	0,11	3,9	0,089
	pastagem	0-10	0,35	1,39	1,67	0,83	0,12	7,2	0,071
		10-30	0,36	1,37	1,66	0,83	0,15	6,4	0,091
	pastagem	0-10	0,40	1,38	1,63	0,85	0,18	2,4	0,056
		10-30	0,45	1,33	1,59	0,83	0,18	4	0,072
	pastagem	0-10	0,27	1,42	1,73	0,82	0,11	8,1	0,075
		10-30	0,29	1,43	1,71	0,84	0,10	10,9	0,055
	mata	0-10	0,35	1,08	1,67	0,65	0,22	1,3	0,068
		10-30	0,38	1,1	1,65	0,67	0,21	4,7	0,069
	pastagem	0-10	0,35	1,4	1,67	0,84	0,16	3,4	0,081
		10-30	0,34	1,38	1,67	0,82	0,15	3,3	0,068
	mata	0-10	0,20	1,22	1,78	0,69	0,13	1,4	0,099
		10-30	0,24	1,21	1,75	0,69	0,12	1,6	0,095
	pastagem	0-10	0,35	1,36	1,67	0,82	0,21	3,5	0,064
		10-30	0,30	1,59	1,70	0,93	0,15	4	0,043
	pastagem	0-10	0,32	1,31	1,69	0,78	0,13	9,5	0,062
		10-30	0,38	1,36	1,65	0,82	0,14	8,2	0,054
LR	pastagem	0-10	0,45	1,15	1,59	0,72	0,25	4,5	0,036
		10-30	0,50	1	1,56	0,64	0,26	4,9	0,042
NV	sorgo	0-10	0,49	1,17	1,56	0,75	0,15	1	0,054
		10-30	0,54	1,36	1,53	0,89	0,26	2,4	0,042
	mata	0-10	0,42	1,27	1,62	0,79	0,16	2,3	0,058
		10-30	0,39	1,38	1,64	0,84	0,14	3,9	0,058
	pastagem	0-10	0,44	1,25	1,60	0,78	0,17	6,5	0,053
		10-30	0,47	1,18	1,58	0,75	0,18	9,5	0,057
	mata	0-10	0,57	1,27	1,50	0,84	0,20	5,6	0,039
		10-30	0,52	1,28	1,54	0,83	0,17	5,8	0,043
RQo	mata	0-10	0,13	1,31	1,83	0,72	0,09	0,7	0,099
		10-30	0,17	1,38	1,80	0,77	0,09	0,8	0,08

A maior parte das amostras coletadas se concentrou em áreas de pastagem, pois é a cobertura predominante da área de estudo. Na Figura 33 pode-se observar a tela da exibição de resultados do programa Qualisolo, que forneceu as curva de distribuição do tamanho de partículas, as porcentagens de argila, silte e areia, a curva de retenção estimada, o valor S e outros resultados que não foram abrangidos nesse trabalho.

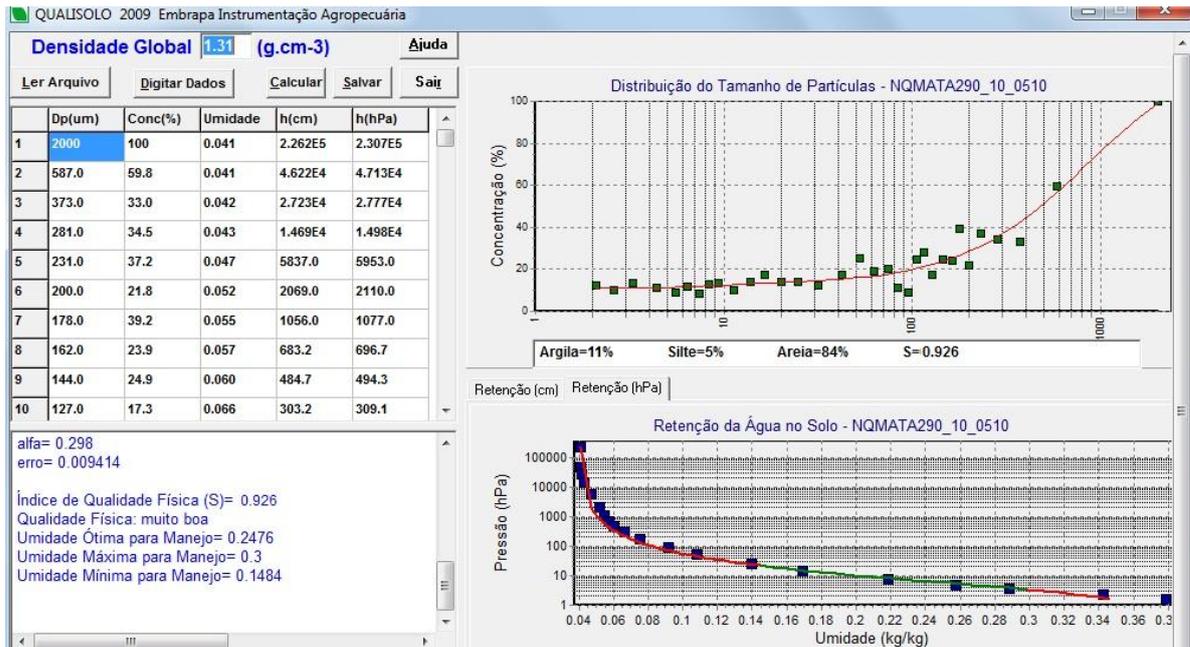


Figura 33 – Tela para demonstração de resultados do programa Qualisolo.

Na Tabela 9 verificamos que os maiores valores de S foram obtidos para as áreas de mata e seringueira, compreendendo entre um valor mínimo de 0,039 a um máximo de 0,101. Os menores valores foram encontrados nos solos com pastagem e com sorgo obtendo maiores valores de  $\rho_{\text{relativa}}$ , o que indica a presença da compactação e degradação física.

O menor valor de S encontrado, como podemos observar na Figura 31, foi encontrado em um solo com alto teor de argila (NV), pois, segundo observações de Dexter (2007), solos com maior teor de argila têm valores mais baixos de S com o mesmo valor de densidade. O mesmo foi observado também neste estudo (Figura 34), a influência da textura no valor S. Há dois grupos distintos de dados, que expressam uma correlação negativa com o valor S, um grupo de solos com textura argilosa, apresentando valores menores de S e outro grupo com textura média a arenosa, e valores maiores de S.

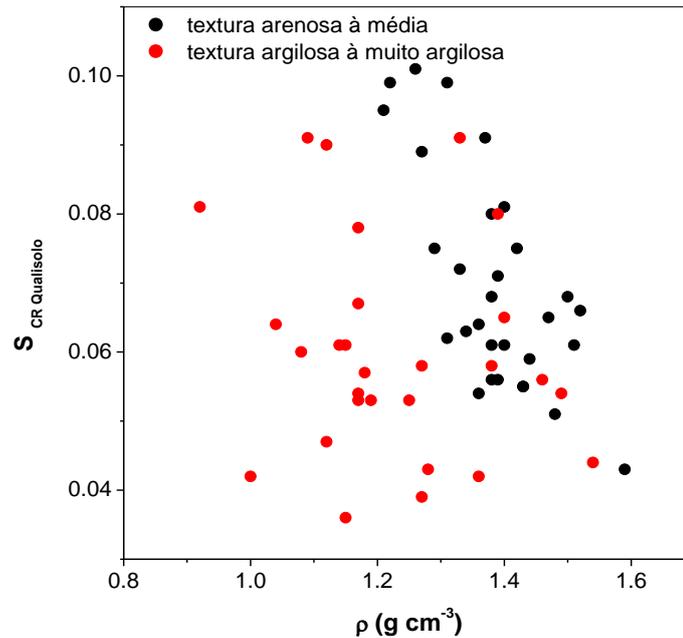


Figura 34 – Correlação entre os valores de densidade e índice  $S_{CRQualisolo}$ .

A dispersão do valor  $S$  para os solos argilosos é devido ao modelo de Arya e Paris que tem grande influência da textura do solo, uma vez que é um modelo semi empírico e para sua estimativa, considera valores como diâmetro das partículas, concentração e densidade do solo, como já discutido no item 6.1. O índice  $S$  estimado pelo modelo de Arya e Paris ( $S_{CRQualisolo}$ ) oferece uma maior confiabilidade nos resultados quando estimado para solos mais arenosos (Figura 35), devido a uma menor dispersão dos valores de  $S$ .

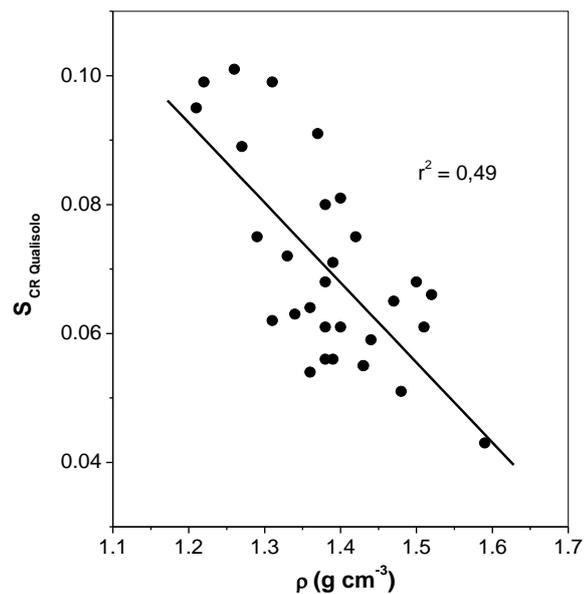


Figura 35 – Correlação entre a densidade do solo e  $S_{CRQualisolo}$ .

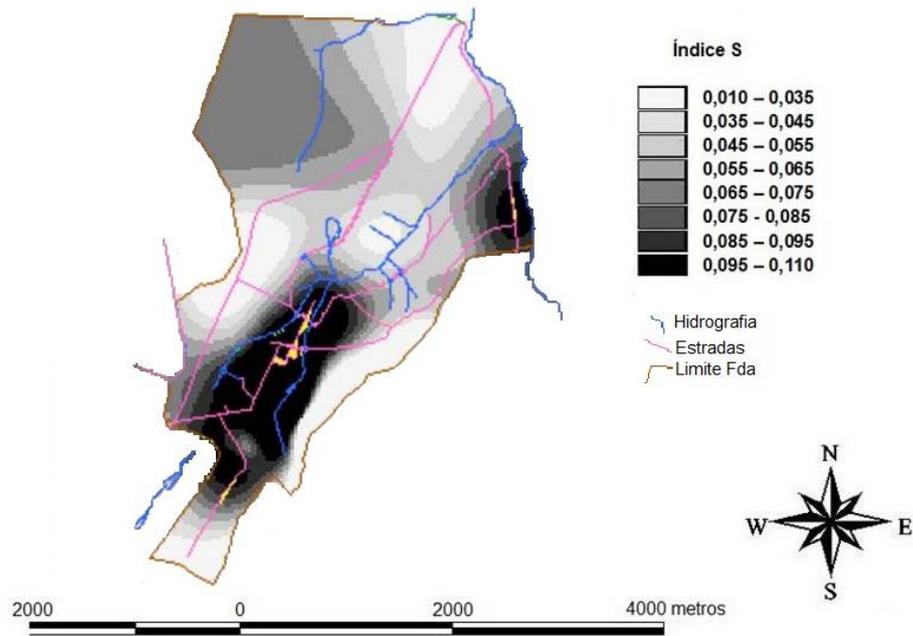


Figura 36 – Qualidade física do solo na Microbacia hidrográfica do Ribeirão Canchim na profundidade de 0-10 cm.

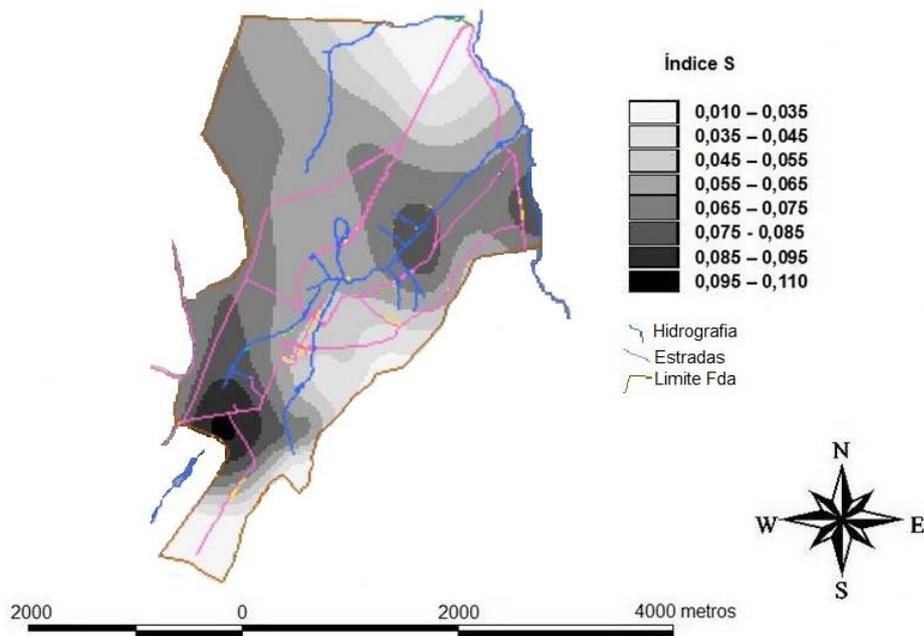


Figura 37 - Qualidade física do solo na Microbacia hidrográfica do Ribeirão Canchim na profundidade de 10-30 cm.

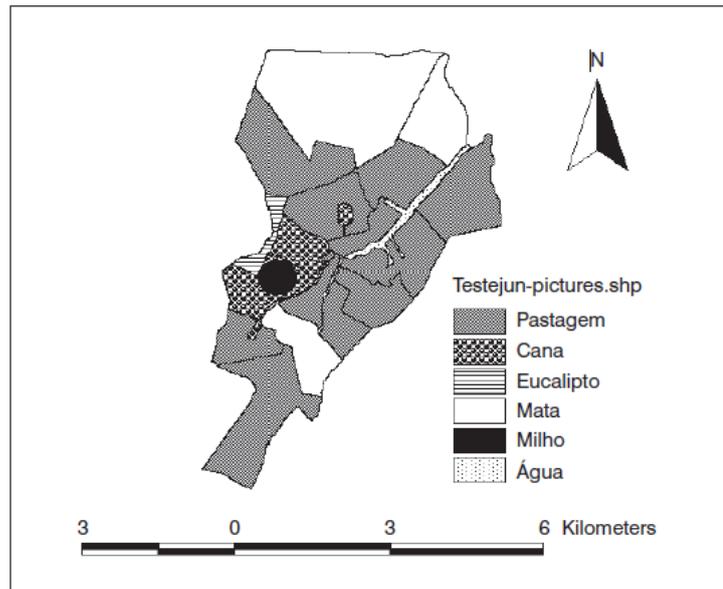


Figura 38 - Mapa de uso do solo da área em estudo (adaptado de SILVA et.al, 2010)

Observa-se que o valor de S não é homogêneo dentro de uma determinada área como mata ou pastagem (Figuras 36 a 38), ou seja, não recebe influência apenas do manejo, e sofre influência de parâmetros como a densidade e a porosidade, bem como da textura do solo. Isso não ocorre somente quando o parâmetro S é calculado pela curva de retenção estimada pelo Qualisolo, mas também para os valores de S calculados a partir da curva de retenção experimental. Segundo Dexter (2007), solos com elevado teor de argila tem valores de S mais baixos, mesmo apresentando os mesmos valores de densidade quando comparados a solos com texturas menos argilosa.

## 6 CONCLUSÕES

1) O modelo de Arya e Paris recebe influencia direta da textura do solo. Essa característica afeta, portanto, a estimativa de S, uma vez que a teoria do índice S de Dexter está baseada na curva de retenção experimental. Seus valores de S quando comparados com  $S_{C\text{Experimental}}$  demonstraram mais confiabilidade quando usado para solos de textura média a arenosa. Mesmo assim, o uso do modelo de Arya e Paris integrado ao programa Qualisolo mostrou-se uma boa alternativa para a determinação do índice S devido a sua rapidez e simplicidade comparativamente ao procedimento tradicional utilizando a curva de retenção experimental.

2) Na avaliação do índice S em escala de microbacia, o parâmetro do solo  $\rho_{\text{relativa}}$ , permitiu a comparação dos resultados da qualidade física entre solos e manejos diferentes. A  $\rho_{\text{relativa}}$  apresentou valores semelhantes entre os manejos dos diferentes solos. Os solos sob as coberturas de milho, sorgo e pastagem apresentam os maiores valores de RP,  $\rho_{\text{relativa}}$  e os menores valores de índice S, sendo classificados como solos de qualidade física pobre.

Nas imagens de microtomografia, para todas as classes de solos, foi possível visualizar uma maior quantidade de espaços vazios e maior diversidade de poros, em relação ao tamanho, para a mata e eucalipto devido a maior presença de matéria orgânica e ausência do trânsito de máquinas. Observa-se também, através dos resultados fornecidos pelo microtomógrafo, que os valores de macroporos e de porosidade total foram menores nos solos que apresentaram degradação da qualidade física (pastagem, para todos os solos e milho e sorgo para LVA). Nas áreas de mata observou-se um maior desenvolvimento dos poros estruturais (macroporos), o que resultou em menor RP e  $\rho_{\text{relativa}}$  do solo.

Constatou-se que o uso, o manejo do solo e a profundidade alteraram consideravelmente o formato e valores das curvas de retenção de água no solo com a redução da porosidade e como consequência a diminuição da capacidade de retenção de água. Estas alterações foram mais acentuadas na área com pastagem para a maioria dos solos e também com milho e sorgo no LVA.

Os valores de S seguem a mesma tendência dos parâmetros do solo que estão associados com a qualidade do solo, que são densidade e RP, porosidade,

curva de retenção e a avaliação qualitativa e quantitativa das imagens de microtomografia que estão associadas com a macroporosidade.

Nesse estudo apenas para uma amostra foi encontrado valor de S inferior ao limite de 0,035, mesmo para solos em que os parâmetros medidos indicaram algum tipo de degradação física. Isso sugere que o valor desse limiar apresentado por Dexter deve ser revisto e atualizado em função de solos com diferentes origens ou locais.

O índice S correlacionou-se significativamente com todos os atributos físicos do solo avaliados com exceção da água disponível que apresentou uma alta dispersão dos pontos. O maior coeficiente de determinação foi encontrado para a macroporosidade seguido da densidade relativa.

3) Na ampliação do estudo em escala de microbacia, verificou-se que os maiores valores de S foram obtidos para as áreas de mata e seringueira e os valores mínimos e máximos encontrados foram 0,039 e 0,101.

A avaliação dos mapas de S gerados indicou que não há homogeneidade de S dentro de uma determinada área como mata ou pastagem, ou seja, S não sofre influência apenas do manejo, mas também da variabilidade dos parâmetros do solo como a densidade e porosidade, bem como da textura do solo.

## REFERÊNCIAS

- ANDRADE, R. S.; STONE, L. F. Índice S como indicador da qualidade física de solos do cerrado brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, p. 382-388, 2009.
- ANDREOLA, F.; COSTA, L. M.; OLSZEWSKI, N. Influência da cobertura vegetal de inverno e da adubação orgânica e, ou, mineral sobre as propriedades físicas de uma Terra Roxa Estruturada. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, p. 857-865, 2000.
- ANGELOTTI NETTO, A.; FERNANDES, J. E.; CENTURION, J. F. Propriedades físicas e indicador de qualidade de um Latossolo Vermelho submetido a diferentes sistemas de uso e manejo. **Irriga**, Botucatu, v. 12, p. 27-37, 2007.
- ARATANI, R. G.; FREDDI, O. S.; CENTURION, J. F.; ANDRIOLI, I. Qualidade física de um Latossolo Vermelho acriférrico sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, p. 677-687, 2009.
- ARAÚJO, R.; GOEDERT, W. J.; LACERDA, M. P. C. Qualidade de um solo sob diferentes usos e sob cerrado nativo. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 1099-1108, 2007.
- ARSHAD, M. A.; MARTIN, S. Identifying critical limits for soil quality indicators in agro-ecosystems. **Agriculture Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 88, p. 153-160, 2002.
- ARVIDSSON, J.; HAKANSSON, I. A model for estimating crop yield losses caused by soil compaction. **Soil Till. Res.**, v. 20, p. 319-332, 1991.
- ARYA, L. M.; PARIS, J. F. A physic empirical model to predict soil moisture characteristics from particle-size distribution and bulk density data. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 45, p. 1023-1030, 1981.
- ASSIS, R. L.; LANÇAS, K. P. Avaliação dos atributos físicos de um Nitossolo vermelho distroférico sob sistema plantio direto, preparo convencional e mata nativa. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, p. 515-522, 2005.
- BACCHI, O. O. S.; REICHARDT, K. Geometria fractal em física do solo. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 50, n. 2, p. 321-325, 1993.
- BASILE, A.; D'URSO, G. Experimental corrections of simplified methods for predicting water retention curves in clay-loamy soils from particle-size determination. **Soil Technology**, Amsterdam, v. 10, p. 261-272, 1997.
- BETZ, C. L.; ALLMARAS, R. R.; COPELAND, S. M.; RANDALL, G. W. Least limiting water range: traffic and long-term tillage influences in a Webster soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 62, p. 1384-1393, 1998.

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

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **The nature and properties of soils**. 12. ed. New Jersey: Prentice Hall, 1999. p. 14-15.

BUDIMAN, M.; Mc BRATNEY, A. B.; MENDONÇA-SANTOS, M. L.; SANTOS, H. G. **Revisão sobre funções de pedotransferência (PTFs) e novos métodos de predição de classes e atributos do solo**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2003. 50 p. (Documentos, 45).

CALDERANO FILHO, B.; SANTOS, H. G. dos; FONSECA, O. O. M. da; SANTOS, R. D. dos; PRIMAVESI, O.; PRIMAVESI, A. C. **Os solos da Fazenda Canchim, Centro de Pesquisa de Pecuária do Sudeste, São Carlos, SP**: Levantamento semidetalhado, propriedades e potenciais. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS; São Carlos: EMBRAPA-PPSE, 1998. 95 p. (CNPS. Boletim de Pesquisa, 7; CPPSE. Boletim de Pesquisa, 2).

CAMARGO, O. A.; ALLEONI, L. R. F. **Compactação do solo e desenvolvimento de plantas**. Campinas: Fundação Cargill, 1983. 44 p.

CANARACHE, A. PENETR – a generalized semi-empirical model estimating soil resistance to penetration. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 16, p. 51-70, 1990.

CENTURION, J. F.; CARDOSO, J. P.; NATALE, W. Efeito de formas de manejo em algumas propriedades físicas e químicas de um Latossolo Vermelho em diferentes agroecossistemas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 5, n. 2, p. 254-258, 2001.

DEMATTE, J. L. I. **Manejo de solos ácidos dos trópicos úmidos região amazônica**. Campinas: Fundação Cargill, 1988. 215 p.

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

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

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

DEXTER, A. R.; CZYZ, E. A.; BIRKÁS, M.; DIAZ-PEREIRA, E.; DUMITRU, E.; ENACHE, R.; FLEIGE, H.; HORN, R.; RAJKAJ, K.; DE LA ROSA, D.; SIMOTA, C. SIDASS project Part 3: The optimum and the range of water content for tillage – further developments. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 82, p. 29-37, 2005.

DEXTER, A. R.; BIRD, N. R. A. Methods for predicting the optimum and the range of water contents for tillage based on the water retention curve. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 57, p. 203-212, 2001.

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

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPq, 1997. 212 p.

EMBRAPA. **Revisão sobre funções de pedotransferência (PTFs) e novos métodos de predição de classes e atributos do Solo / Minasny Budiman... [et al.]**. - Rio de Janeiro : Embrapa Solos, 2003. 50 p.. - (Embrapa Solos. Documentos; n. 45)

FIDALSKI, J.; TORMENA, C. A. Homogeneidade da qualidade física do solo nas entrelinhas de um pomar de laranja com sistemas de manejo da vegetação permanente. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 637-645, 2007.

GIAROLA, N. F. B.; SILVA, A. P.; IMHOFF, S. Relações entre propriedades físicas e características de solos da região sul do Brasil. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, p. 885-893, 2002.

GODEFROY, J.; JACQUIN, F. Relation entre la stabilité structurale des sols cultivés et les apports organiques en conditions tropicales; comparasion avec les sols forestiers. **Fruits**, Paris, v. 30, p. 595-612, 1975.

GREENWOOD, K. L.; MCKENZIE, B. M. Grazing effects on soil physical properties and the consequences for pastures: a review. **Australian Journal of Experimental Agriculture**, East Melbourne, v. 41, p. 1231-1250, 2001.

GUPTA, S. C.; LARSON, W. E. Estimating soil water retention characteristics from particle size distribution, organic matter percent, and bulk density. **Water Resources Research**, Washington, DC, v. 15, p. 1633-1635, 1979.

ISLAM, K. R.; WEIL, R. R. Land use effects on soil quality in a tropical forest ecosystem of Bangladesh. **Agriculture Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 79, p. 9-19, 2000.

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

LANZANOVA, M. E.; NICOLOSO, R. da S.; LOVATO, T.; ELTZ, F. L. F.; AMADO, T. J. C.; REINERT, D. J. Atributos físicos do solo em sistema de integração lavoura-pecuária sob plantio direto. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 1131-1140, 2007.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. **Advances in Soil Science**, New York, v. 1, p. 277-294, 1985.

LINDSTRON, M. J.; VOORHEES, W. B. Response of temperate crops to soil compaction. In: SOANE, B.D.; van OUWERKERK, C. Soil compaction in crop production. London, Elsevier, p.265-268. 1994.

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

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., 2007, Gramado, RS. **Anais...** Gramado: SBCS, 2007. 1 CD-ROM.

MOTTA, A. C. V.; REEVES, D. W.; TOUCHTON, J. T. Longterm tillage system effects on chemical soil quality indicators in the southeastern coastal plain. In: ANNUAL SOUTHERN CONSERVATION TILLAGE CONFERENCE FOR SUSTAINABLE AGRICULTURE, 23., 2000, Monroe, LA. **Agricultural water quality and quantity: Issues for the 21st century; proceedings...** Baton Rouge, LA, 2000. p. 114-120.

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

NAIME, J. M.; SHINYA, V. T.; VAZ, C. M. P. Programa para estimativa indireta da curva de retenção da água no solo. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 15., 2004, Santa Maria, RS. **Anais...** Santa Maria, RS: UFSM, 2004. 1 CD-ROM.

NAIME, J. M.; VAZ, C. M. P.; MACEDO, A. Determinações físicas do solo a partir da granulometria: programa qualisolo. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 16., 2006, Aracaju, SE. **Anais...** Aracaju, SE: SBCS, 2006. 1 CD-ROM.

NAIME, J. M.; VAZ, C. M. P.; MACEDO, A. Automated soil particle size analyzer based on gamma-ray attenuation. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 31, n. 3, p. 295-304, 2001.

NIMER, E. Clima. In: IBGE. **Geografia do Brasil: Região Sudeste**. Rio de Janeiro, 1977. v. 3, p. 51-89.

NIMMO, J. R. Modeling structural influences on soil water retention. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 61, p. 712-719, 1997.

OLIVEIRA, J. B. **Pedologia aplicada**. Piracicaba: FEALQ, 2005. 574 p.

OLIVEIRA, J. C. M.; VAZ, C. M. P.; REICHARDT, K.; SWARTZENDRUBER, D. Improved soil particle-size analysis through gamma-ray attenuation. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 60, n. 7, p. 23-26, 1997.

PEREIRA, Fabiana de Souza et al . Qualidade física de um Latossolo Vermelho submetido a sistemas de manejo avaliado pelo Índice S. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa. v. 35, n. 1, Feb. 2011. Available from <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0100-06832011000100008&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832011000100008&lng=en&nrm=iso)>. access on 24 Aug. 2011. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832011000100008>.

PRIMAVESI, O.; PRIMAVESI, A. C. P. de A.; PEDROSO, A. de F.; CAMARGO, A. C. de; RASSINI, J. B.; ROCHA FILHO, J.; OLIVEIRA, G. P. de; CORREA, L. de A.; ARMELIN, M. J. A.; VIERIA, S. R.; DECHEN, S. C. F. **Microbacia hidrográfica do Ribeirão Canchim: um laboratório real de laboratório ambiental**. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 1999. 133 p. (Boletim de Pesquisa, 5).

RAWLS, W. J.; GISH, T. J.; BRAKENSIEK, D. L. Estimating soil water retention from soil physical properties and characteristics. **Advances in Soil Science**, New York, v. 16, p. 213-234, 1991.

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

SEVERIANO, E. C. Alterações estruturais de Latossolos representativos da região do cerrado e potencial de uso de solos cultivados com cana-de-açúcar. 2010. 148 p. Teses (Doutorado) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2010.

SILVA, A. P.; KAY, B. D. Estimating the least limiting water range of soils from properties and management. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 61, p. 877-883, 1997.

SILVA, A. P.; KAY, B. D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range of soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, p. 1775-1781, 1994.

SILVA, M. S. L.; RIBEIRO, M. R. Influência do cultivo contínuo da cana-de-açúcar em propriedades morfológicas e físicas de solos argilosos de tabuleiro no estado de Alagoas. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 16, p. 397-402, 1992.

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

TOLENTINO, M. **Estudo crítico sobre o clima da região de São Carlos**. São Carlos: Prefeitura Municipal, 1967. 78 p. (Concurso de Monografias Municipais).

TOPP, G. C.; GALGANOV, Y. T.; WIRES, K. C.; CULLEY, J. L. B. **Non limiting water range (NLWR): an approach for assessing soil structure**. Soil Quality

Evaluation Program. Ottawa: Agriculture and Agri-Food Canada, Central Experimental Farm, 1994. 36 p. (Technical Report, 2).

TOPP, G. C.; REYNOLDS, W. D.; COOK, F. J.; KIRBY, J. M.; CARTER, M. R. Physical attributes of soil quality. In: GREGORICH, E. G.; CARTER, M. R. (Ed.). **Soil quality for crop production and ecosystem health**. Elsevier, New York, NY: Elsevier, 1997. p. 21-58. (Developments in Soil Science, 25).

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Soil physical quality of a Brazilian Oxisol under two tillage systems using the least limiting water range approach. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 52, p. 223–232, 1999.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v. 22, p. 573-581, 1998.

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

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

VAZ, C. M. P.; IOSSI, M. de F.; NAIME, J. de M.; MACEDO, A.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; COOPER, M. Validation of the Arya and Paris water retention model for Brazilian Soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 69, n. 3, p. 577-583, 2005.

VAZ, C. M. P.; HOPMANS, J. W. Simultaneous measurement of soil strength and water content with a combined penetrometer-moisture probe. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 65, n. 1, p. 4-12, 2001.

VAZ, C. M. P.; OLIVEIRA, J. C. M.; REICHARDT, K.; CRESTANA, S.; CRUVINEL, P. E.; BACCHI, O. O. S. Soil mechanical analysis through gamma ray attenuation. **Soil Technology**, Amsterdam, v. 5, p. 319-325, 1992.

VAZ, C. M. P.; BASSOI, L. H.; HOPMANS, J. W. Contribution of water content and bulk density to field soil penetration resistance as measured by a combined cone penetrometer-TDR probe. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 60, n. 1-2, p. 35-42, 2001.

VAZ, C. M. P.; NAIME, J. M.; MACEDO, A. Soil particle size fractions determined by gamma-ray attenuation. **Soil Science**, New Brunswick, v. 164, n. 6, p. 403-410, 1999.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo: Ed. McGraw-Hill do Brasil, 1975. 245 p.

WRAITH, J. M.; OR, D. Nonlinear parameter estimation using spreadsheet software. **Journal of Natural Resources and Life Sciences Education**, Madison, v. 27, p. 13–19, 1998.

WU, L.; FENG, G.; LETEY, J.; FERGUSON, L.; MITCHELL, J.; MCCULLOUGH-SANDEN, B.; MARKEGARD, G. Soil management effects on the nonlimiting water range. **Geoderma**, Amsterdam, v. 114, p. 401–414, 2003.