

Foto: Helton Carlos de Leão



## Aplicação do Modelo de Arya e Paris para Estimativa da Qualidade Física do Solo

Juliana Maria Manieri<sup>1</sup>  
João de Mendonça Naime<sup>2</sup>  
Carlos Manoel Pedro Vaz<sup>3</sup>  
Osny Oliveira Santos Bacchi<sup>4</sup>

Quantificar determinados parâmetros do solo, como atribuir valores limitantes de resistência à penetração para determinada cultura, densidade, porosidade, índices que informam o estado atual de conservação do solo ou simplesmente a sua qualidade física, química ou biológica, sempre despertou grande interesse. O índice S foi proposto neste contexto, como sendo um indicativo da qualidade física do solo. Por exemplo, para solos que apresentam valores de S acima de 0,035, indica solos de boa qualidade física; quando o S estiver entre 0,035-0,020, solo pobre e menor que 0,020, solo muito pobre. Essa classe de valores foi apresentada por Dexter (2004), e a sua origem está na curva de retenção de água no solo, que é obtida através de uma medida física denominada de retenção de água no solo. Essa medida avalia a relação entre conteúdo de água no solo e a energia com que a água está retida na sua matriz por forças de adsorção e de capilaridade. A relação existente é característica para cada solo, dependendo da estrutura - distribuição de tamanho de poros -, e da textura DTP gravado em arquivo no formato texto.

O presente trabalho tem como objetivo propor o cálculo do índice S a partir da curva de retenção estimada pelo modelo de Arya & Paris, utilizando um conjunto de 111 amostras de solos pré-adquiridas contendo informações da distribuição de tamanho de partículas pelo analisador granulométrico densidade global e curva de retenção analisadas pelos laboratórios de solos da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"-ESALQ e Universidade Federal do Rio Grande do Sul UFRGS.

### Material e Métodos

Para o experimento foi utilizado um banco de dados já estente referente a 111 amostras de solos com

textura variando de arenoso a muito argiloso. Foram determinadas também para essas amostras as curvas de retenção nos laboratórios da ESALQ e UFRGS, possibilitando a comparação do índice S obtido pelo programa Qualisolo, utilizando o modelo Arya & Paris e diretamente da curva de retenção. A seguir será descrito detalhadamente cada método utilizado.

### a) Determinação do índice S a partir da curva de retenção

Para essa determinação é necessário fazer a medida em laboratório da retenção de água no solo e através dos valores de umidade e potencial mátrico obtidos dessa análise, construir a curva de retenção de água no solo. A seguir será explicado passo a passo essa determinação.

### Curva de retenção de água no solo

A medida de retenção de água no solo foi realizada nos laboratórios de física do solo da ESALQ e da UFRGS, com aplicação das seguintes pressões: 1, 2, 4, 8, 10, 33, 100, 500 e 1500 kPa e 1, 5, 10, 33, 100, 500 e 1500 kPa, respectivamente. Para isso foram coletados em campo, amostras indeformadas de solo com o auxílio de um cilindro de metal com dimensões aproximadas de 5 cm de altura e 5 cm de diâmetro.

Com os valores de umidade e potencial, fornecidos pela análise de retenção de água no solo, foi realizado o ajuste ao modelo de Genuchten (1980), utilizando a equação 1. Como descrito em Dexter (2004) para esse procedimento, foram utilizados os valores de umidade gravimétrica expressos em  $\text{kg kg}^{-1}$  e os valores de potencial da água no solo, hPa.

<sup>1</sup>Engenharia Agrônoma, MSc., Embrapa Instrumentação Agropecuária, C.P. 741, CEP 13560-970, São Carlos, SP, manieri@cnpdia.embrapa.br

<sup>2</sup>Engenharia Eletrônica, Dr., Pesquisador, Embrapa Instrumentação Agropecuária, C.P. 741, CEP 13560-970, São Carlos, SP, 13560-970, naime@cnpdia.embrapa.br

<sup>3</sup>Física, Dr., Pesquisador, Embrapa Instrumentação Agropecuária, C.P. 741, CEP 13560-970, São Carlos, SP, vaz@cnpdia.embrapa.br

<sup>4</sup>Engenharia Agrônoma, Dr., Centro de Energia Nuclear na Agricultura/USP, Caixa Postal 96, Piracicaba, SP, CEP 13400-970, osny@cena.usp.br

$$r_s = r_r \left( \frac{\theta_s}{\theta_r} \right)^{\frac{n-1}{n}} \quad (1)$$

onde  $r_r$  e  $r_s$  (kg kg<sup>-1</sup>) são os conteúdos de água residuais e do solo saturado, respectivamente,  $\psi$  (hPa) é o potencial mátrico e  $n$  são parâmetros de ajuste sem significado físico. Os parâmetros  $r_r$ ,  $r_s$  e  $n$  foram obtidos pelo ajuste não-linear de mínimos quadrados (WRAITH e OR, 1998), usando a ferramenta solver do Excel (Microsoft®).

A partir dos valores das variáveis  $r_r$ ,  $n$ ,  $r_s$  e  $\psi$  calculou-se o índice S utilizando a equação descrita por Dexter (2004):

$$S = \frac{2n-1}{n} \left( \frac{\psi}{r_s} \right)^{\frac{1}{n-2}} \quad (2)$$

Como valores de referência para S representar a qualidade física do solo, Dexter (2004) definiu que S maior que 0,035 indica boa qualidade, 0,020 < S ≤ 0,035 solo pobre e S ≤ 0,020 solo muito pobre. Neste trabalho convençionamos denominar o cálculo do índice S feito a partir da curva de retenção experimental de S<sub>CR</sub>.

b) Determinação do Índice S a partir do modelo de Arya e Paris e Programa Qualisolo

Para calcular o índice S indiretamente, ou seja, sem utilizar a curva de retenção experimental, determinada em laboratório, primeiramente foi necessário obter a curva de distribuição do tamanho de partículas obtida da análise granulométrica do solo e posteriormente aplicar o modelo de Arya & Paris para estimar a curva de retenção de água no solo, os quais serão descritos detalhadamente a seguir.

Análise Granulométrica

Essa determinação foi realizada através de um equipamento chamado analisador granulométrico automático de solos (NAIME et al., 2001), baseado na atenuação de um feixe de raios gama pelas partículas dispersas em sedimentação. Com essa curva podemos visualizar de forma detalhada como estão distribuídas as partículas com dimensões entre 2 µm e 2mm. As amostras de solo para a análise foram coletadas em três áreas próximas uma das outras em uma profundidade de 0 a 20cm. Essas amostras foram homogeneizadas e delas foi retirada uma única amostra, chamada de amostra composta. As amostras foram secas em estufa a temperatura de 60 °C por um período de 24 horas (EMBRAPA, 1997) e peneiradas em malha de 2 mm, para ter certeza da presença somente de areia, silte e argila, excluindo dessa forma cascalhos e calhaus. Depois foram pesadas 40 g de solo e deixadas em contato com 10 ml de NaOH, 1 mol L<sup>-1</sup>, por uma noite. Após esse período as amostras passaram por agitação mecânica de alta rotação por um tempo de 15 minutos, para solos argilosos, ou 5 minutos, para solos arenosos. Após o processo de agitação as amostras 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 e 20 minutos. Os resultados foram armazenados em um arquivo de texto contendo dados de concentração acumulada, em porcentagem da concentração inicial, e

diâmetro de partícula (µm). As medidas no analisador foram feitas em triplicatas, e com o valor médio das análises foi construído a curva de distribuição do tamanho de partículas.

Modelo de Arya e Paris e Programa Qualisolo

Com o modelo matemático de Arya & Paris e o programa Qualisolo foi possível estimar o valor de S. Esse modelo calcula os valores de umidade e potencial mátrico que seriam obtidos pela análise de retenção de água no solo a partir dos valores de diâmetro e concentração das partículas do solo obtidos através da análise granulométrica. Por isso, obtém-se a curva de retenção com um conjunto de pontos muito maior, com mais agilidade e menor custo. O modelo é baseado em dois conceitos. Primeiro a equação da capilaridade que relaciona o potencial mátrico ( $\psi$ ), com o raio do poro ( $r$ )

$$\psi = \frac{2 \sigma \cos \theta}{w g r_i} \quad (3)$$

onde  $\sigma$  (N m<sup>-1</sup>) é a tensão superficial na interface ar-água,  $\theta$  é o ângulo de contato entre a água e a superfície da parede do poro (assumido como  $\theta = 0$ ),  $w$  (kg m<sup>-3</sup>) a densidade da água e  $g$  (m s<sup>-2</sup>) a aceleração da gravidade. No sistema internacional de unidade (SI),  $\sigma = 0,0728$  Nm<sup>-1</sup> e  $g = 9,81$  m s<sup>-2</sup>.

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.

$$n_i = \frac{w_i}{w} \quad (4)$$

onde  $n_i$  (m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>) é a porosidade,  $w_i$  (kg kg<sup>-1</sup>) é a fração de massa, calculada por meio de uma função sigmoideal ajustada aos dados de distribuição de tamanhos de partículas do solo. A porosidade do solo pode ser estimada pela expressão  $n = 1 - (\rho_s / \rho_p)$ , onde  $\rho_s$  (kg m<sup>-3</sup>) é a densidade do solo e  $\rho_p$  (kg m<sup>-3</sup>) é a densidade das partículas do solo considerada a mesma para todas as frações de massa  $w_i$ .

O raio dos poros ( $r_i$ ) é determinado do raio das partículas ( $R_i$ ), considerando o empacotamento de partículas esféricas e um fator de escalonamento  $e$ , que corrige a estimativa para solos estruturados, por meio da equação:

$$r_i = R_i \sqrt{4en_i} / 6 \quad (5)$$

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

$$n_i = \frac{3w_i}{4 R_i^3 \rho_p} \quad (6)$$

$$e = \frac{p}{s} \quad (7)$$

O potencial mátrico do solo é calculado pela combinação das equações 3, 5, 6 e 7:

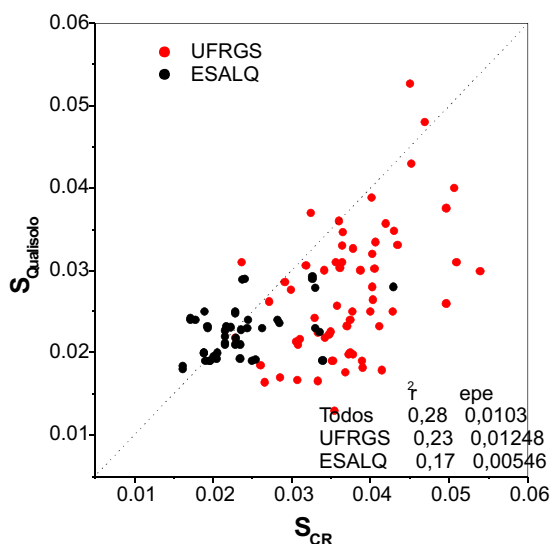
$$\psi = \frac{2 \sigma \cos \theta}{w g R_i} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{\rho_p}{s} \frac{3w_i}{4 R_i^3 \rho_p}} \quad (8)$$

Uma vez conhecido o fator de escalonamento, a curva de retenção pode ser estimada calculando-se a umidade pela Eq. 4 e o potencial mátrico pela equação 8, para as seguintes 20 classes de diâmetros de partículas: 1, 2, 3, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 70, 100, 150, 200, 300, 400, 600, 800, 1000, 1500 e 2000  $\mu$ m.

O programa Qualisolo utiliza o arquivo de dados de concentração e diâmetro de partículas gerado pelo Analisador Granulométrico e a densidade do solo e aplica o modelo Arya & Paris. Em seguida, a equação de van Genuchten é ajustada aos 20 pontos do modelo Arya & Paris e o índice S é calculado na Eq. 2. Portanto, dessa forma, o cálculo do índice S feito a partir da curva de retenção estimada será chamado neste trabalho de  $S_Q$ .

**Resultados e Discussão**

Na Figura 1 é apresentado a relação entre valores de  $S_Q$  versus S calculado de forma direta, a partir da curva de retenção experimental ( $S_{CR}$ ) e também a distinção entre as amostras analisadas no laboratório de solos da UFRGS e da ESALQ.



**Fig. 1.** Relação entre valores de índice S calculados através do programa Qualisolo  $S_{Qualisolo}$  x S calculado a partir da curva de retenção experimental  $S_{CR}$ , para as 111 amostras de solos.

Analisando o coeficiente de correlação entre os solos das 111 amostras ( $r^2=0,28$ ), verificou-se a necessidade de trabalhar com um conjunto ainda maior de solos em locais com densidades variadas. Observa-se uma diferença entre os dois grupos (ESALQ e UFRGS). Os dados ESALQ, observando a Figura 1, demonstram uma dispersão menor dos dados se comparado ao grupo UFRGS, mas apresentaram um  $r^2$  inferior (0,17). No entanto, o erro padrão da estimativa é menor para o conjunto ESALQ (0,0055) e maior para o conjunto UFRGS (0,0125) indicando que houve uma melhor aplicação do modelo para o conjunto ESALQ.

Esse fato pode ser explicado pela pequena amplitude na variação dos valores de S para esse conjunto de dados (ESALQ) e por um número de amostras inferior. Essa diferença dos valores de S entre os dois laboratórios também pode ser justificada devido a problemas práticos da câmara de pressão como o estabelecimento do equilíbrio, que ocorre quando cessa a saída de água da amostra na câmara de pressão, pois o julgamento do

exato instante desse processo ainda é questionável (BACCHI et al., 1998; CENTURION et al., 1997). Outros problemas metodológicos na determinação de curvas características de água no solo podem também ser responsáveis por tais diferenças. Moraes et al. (1993) verificaram grande variabilidade de resultados, principalmente em altas pressões. Essa variabilidade encontrada foi atribuída principalmente às variações de temperatura da região, ou seja, grandes variações entre a máxima e a mínima em um mesmo dia, que provocam efeitos diretos sobre bolhas de ar aprisionadas nas amostras de solo.

Na comparação entre os métodos para o cálculo do índice S ( $S_{CR}$  e  $S_Q$ ), verifica-se na Tabela 1, que  $S_{CR}$  apresentou uma maior variabilidade entre seus pontos ( $dpm = 0,0091$ ), demonstrando ser mais sensível às variações de densidade ou textura. No entanto, os valores de S máximo e mínimo para os dois métodos mostraram-se muito próximos. Já quando foram avaliados os conjuntos separadamente (Tabelas 2 e 3), constatou-se que os valores de S (moda e média) para os dois métodos, dos solos analisados na ESALQ estão muito próximos entre si e com um  $dpm$  abaixo do grupo de solos UFRGS.

**Tabela 1.** Valores referentes à moda, média, desvio padrão da média ( $dpm$ ), mínimo e máximo, para as 111 amostras de solo com curva de retenção analisada nos laboratórios da ESALQ e do UFRGS.

	moda	média	dpm	mínimo	máximo
$S_{CR}$	0,0314	0,0314	0,0091	0,0161	0,0539
$S_Q$	0,0224	0,0252	0,0068	0,0129	0,0527

**Tabela 2.** Valores referentes à moda, média, desvio padrão da média ( $dpm$ ), mínimo e máximo, para as 64 amostras de solo com curva de retenção analisada no laboratório da UFRGS.

	moda	média	dpm	mínimo	máximo
$S_{CR}$	0,0369	0,0371	0,0065	0,0228	0,0539
$S_Q$	0,02611	0,0272	0,0080	0,0129	0,0527

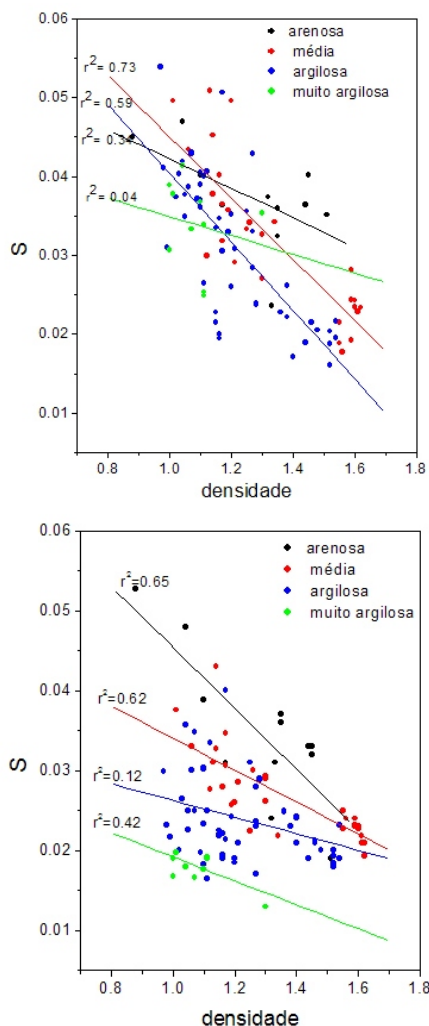
**Tabela 3.** Valores referentes à moda, média, desvio padrão da média ( $dpm$ ), mínimo e máximo, para as 48 amostras de solo com curva de retenção analisada no laboratório da ESALQ.

	moda	média	dpm	mínimo	máximo
$S_{CR}$	0,0228	0,0237	0,0058	0,0161	0,0429
$S_Q$	0,0228	0,0225	0,0031	0,018	0,0290

Na Fig. 2 observa-se o efeito da densidade no índice S. Verifica-se nos gráficos a mesma tendência observada por Dexter (2004), ressaltando que o método  $S_Q$  apresentou valores de  $r^2$  superiores comparados ao método  $S_{CR}$ .

Dexter (2004), explica em seu trabalho 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 suficientemente resistente ao estresse aplicado a ele. Essa perda preferencial dos poros maiores tem o efeito de

alterar a distribuição de tamanhos dos poros e conseqüentemente a curva de retenção de água no solo. Por isso a tendência de uma redução do índice S com o aumento da densidade do solo. No entanto, o autor explica que nem sempre isso acontece, pois algumas vezes a compactação pode aumentar o número de microporos capazes de reter água e resultar e melhorar a qualidade física do solo.



**Fig. 2.** Efeito da densidade e da textura nos valores de índice S calculado para as 111 amostras, a partir do programa Qualisolo e da curva de retenção experimental, respectivamente.

### Conclusões

Portanto, conclui-se neste trabalho que:

1) Para a validação do modelo de Dexter é muito importante um conjunto grande de amostras com variação de textura e densidade;

2) As medidas comparativas de obtenção de S demonstraram que o programa Qualisolo é uma ferramenta que contribuirá para a agilidade das análises físicas do solo;

3) Para se obter valores confiáveis do índice S determinado tanto experimentalmente como estimado é necessário muito rigor para as metodologias empregadas (retenção de água e análise granulométrica).

4) O índice S é influenciado pela densidade e textura do solo como demonstrado em Dexter (2004).

### Referências

- ARYA, L. M.; PARIS, J. F. A physicoempirical model to predict soil moisture characteristics from particle-size distribution and bulk density data. **Journal / Soil Science Society of América**, Madison, v. 45, p. 1023-1030, 1981.
- BACCHI, O. O. S.; REICHARDT, K. L. C. M.; NIELSEN, D. R. Gammaray beam attenuation as an auxiliary technique for the evaluation of soil water retention curve. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 55, p. 499-502, 1998.
- CENTURION, J. F.; MORAES, M. H.; DELLA LIBERA, C. L. P. Comparação de métodos para a determinação da curva de retenção de água em solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 21, p. 173-179, 1997.
- 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, 2004.
- EMBRAPA. **Manual de Métodos de Análise de Solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa-CNPq, 1997. p. 27-36.
- GENUCHTEN, M. T. van. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Journal / Soil Science Society of América**, Madison, v. 44, p. 892-898, 1980.
- MORAES, S. Q.; LIBARDI, P. L.; DOURADO NETO, D. Problemas metodológicos na obtenção da curva de retenção de água pelo solo. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 50, n. 3, p. 383-392, 1993.

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

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.

### Comunicado Técnico, 104

Exemplares desta edição podem ser adquiridos na:  
**Embrapa Instrumentação Agropecuária**  
 Rua XV de Novembro, 1542 - Caixa Postal 741  
 CEP 13560-970 - São Carlos-SP  
**Fone:** 16 2107 2800 - **Fax:** 16 2107 2902  
**e-mail:** sac@cnpdia.embrapa.br  
<http://www.cnpdia.embrapa.br>

#### 1a. edição

1a. impressão 2009: tiragem 300

Ministério da  
 Agricultura, Pecuária  
 e Abastecimento



### Comitê de Publicações

**Presidente:** Dr. Luiz Henrique Capparelli Mattoso  
**Membros:** Dra. Débora Marcondes B. P. Milori,  
 Dr. João de Mendonça Naime,  
 Dr. Washington Luiz de Barros Melo  
 Valéria de Fátima Cardoso

**Membro Suplente:** Dr. Paulo S. P. Herrmann Junior

### Expediente

**Supervisor editorial:** Dr. Victor Bertucci Neto  
**Normalização bibliográfica:** Valéria de Fátima Cardoso  
**Tratamento das ilustrações:** Valentim Monzane  
**Editoração eletrônica:** Manoela Campos