

## Comparação de Modelos para Determinação Indireta da Curva de Retenção de Água no Solo: Aplicação em Solos da Bacia do Arroio Taboão, RS

*Comparing models for indirect determination of the soil water retention curve: a case study in soils of the Taboão creek basin, RS.*

Tirzah M. de Melo<sup>1</sup>; Sônia Souza Franco Bretanha<sup>2</sup>; Margarita Pereira<sup>3</sup>; Nilza Maria dos Reis Castro<sup>4</sup>; José Antônio Saldanha Louzada<sup>5</sup> e Marquis Henrique Campos de Oliveira<sup>6</sup>

<sup>1,2</sup> Professora Assistente, Centro de Engenharias, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas. Doutora em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, RS Brasil

tirzahmelo@hotmail.com; bretanha@terra.com.br

<sup>3</sup> Doutoranda em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, RS Brasil

mepereira@gmail.com

<sup>4,5</sup> Professor(a) Associado(a), Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, RS Brasil

nilza@iph.ufrgs.br; louzada@iph.ufrgs.br

<sup>6</sup> Mestre em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, RS Brasil

mhenriquee@hotmail.com

Recebido: 07/08/14 - Revisado: 23/10/14 - Aceito: 02/06/15

### RESUMO

O conhecimento da capacidade de retenção de água no solo é de fundamental importância para o estudo dos processos físicos envolvidos no sistema solo-água. Sua representação é feita através da curva de retenção, obtida em laboratório, com a utilização de equipamentos específicos e amostras deformadas ou indeformadas, ou diretamente no campo, com o emprego de tensiômetros e medidores de umidade. O procedimento mais tradicional consiste em determiná-la em laboratório utilizando amostras indeformadas e a Câmara de Richards. Apesar de consagrado, este ensaio com esse equipamento tem como inconveniente o tempo necessário para realizá-lo. Para evitar este problema, diferentes metodologias vêm sendo propostas visando a obtenção da curva de retenção de forma indireta, a exemplo das funções de pedotransferência. O objetivo desta pesquisa foi avaliar o desempenho de dois métodos dessa natureza a partir da comparação de seus resultados com os resultados da metodologia clássica. Os métodos avaliados foram o de Arya & Paris (1981) e os dois modelos propostos por Walczak et al. (2006). A base de dados foi constituída de 78 amostras indeformadas coletadas em nove tipos de solos, sendo oito deles argilosos, na bacia do arroio Taboão na região do município de Pejuçara – Rio Grande do Sul. Os resultados obtidos mostraram que todos os modelos analisados subestimaram sistematicamente as umidades dos solos em relação às obtidas em laboratório. Em 65 % das amostras analisadas, os modelos de Walczak et al. (2006) apresentaram desempenhos superiores ao modelo de Arya & Paris (1981).

**Palavras Chave:** Funções de pedotransferência. Câmara de Richards. Sistema solo-água.

### ABSTRACT

Soil capacity of retaining water is fundamentally important for physical processes studies involved with the soil-water system. Its representation is made by means of the retention curve, obtained in laboratory, with the use of specific equipments and collected samples, or indirectly in the field, employing tensiometers. The most common procedure consists in determining the retention curve in laboratory utilizing undisturbed samples and the Richards Chamber. Despite being well established, this method has the drawback of being time-consuming. In order to avoid this shortcoming, different methodologies have been proposed to permit obtaining the retention curve indirectly, being the pedotransfer functions some examples of them. The objective of this research was to evaluate the performance of two methods of this nature comparing their results to those obtained with the classic methodology. The evaluated methods were that of Arya & Paris (1981) e the two models proposed by Walczak et al. (2006). The data base was constituted of 78 undisturbed samples collected from nine soil types, being eight of them clayey soils, in the Taboão stream basin, in the region of the city of Pejuçara - state of Rio Grande do Sul. The obtained results have showed that all models systematically underestimated the soil moistures when compared to those measured in laboratory. In 65 % of the analyzed samples, the models proposed by Walczak et al. (2006) provided better performances than the model of Arya & Paris (1981).

**Keywords:** Pedotransfer Functions. Richards Chamber. Soil-Water System

## INTRODUÇÃO

A retenção de água no solo é uma propriedade que pode ser descrita pela dependência entre a umidade e o potencial matricial (WALCZAK et al., 2006), sendo a curva de retenção a função que descreve essa dependência (Vieira, 2006). Sua determinação geralmente é feita em laboratório utilizando-se métodos experimentais como o do funil de placa porosa, mesa de tensão ou câmaras de pressão (Câmara de Richards) (EMBRAPA, 1997).

Devido às dificuldades experimentais e ao longo tempo envolvido nessas determinações, têm-se observado um crescente interesse por métodos indiretos de estimativa da capacidade de retenção da água nos solos (ARYA et al., 1999; PACHEPSKY; RAWLS, 1999). Há na literatura a divulgação de inúmeros trabalhos desenvolvidos nessa direção, entre os quais destacam-se as funções de pedotransferência.

Essa expressão foi introduzida por Bouma (1989) para padronizar outros termos anteriormente utilizados com a mesma finalidade, e com o significado de transformar dados disponíveis em dados necessários. As primeiras tentativas para o desenvolvimento de funções desse tipo remontam do início do século XX e, à medida que evoluíram, passaram a indicar uma tendência de estudos envolvendo métodos indiretos para as décadas seguintes. Atualmente, as funções de pedotransferência são largamente utilizadas em diferentes áreas de estudo, sendo em geral de três tipos: classe (BAKER; ELLISON, 2008), as quais estimam um valor médio das propriedades hidráulicas do solo para cada classe textural; pontual (GHANBARIAN-ALAVIJEH; MILLÁN, 2010), as quais estimam diretamente a umidade ou condutividade hidráulica em valores discretos de potenciais; e paramétrica (SANTRA; DAS, 2008), as quais estimam os parâmetros empíricos da curva de retenção de um modelo definido a priori. Ainda podem ser classificadas como empíricas ou conceituais. As primeiras usam dados taxonômicos rotineiramente disponíveis, como percentuais de areia, silte ou argila, conteúdo de matéria orgânica, entre outros. As funções conceituais, ou semi-físicas, se valem das relações entre a distri-

buição do tamanho das partículas e a distribuição do tamanho dos poros (MOHAMMADI; VANCLOOSTER, 2011).

Arya e Paris (1981) propuseram uma função de pedotransferência baseada na similaridade entre as curvas de distribuição do tamanho de partículas e as curvas de retenção de água no solo, podendo ser classificada como contínua e conceitual, integrada ao programa Qualisolo. Outra função mais recente foi desenvolvida por Walczak et al. (2006), onde a relação entre umidade do solo e potencial matricial é estabelecida em função dos parâmetros físicos do solo estatisticamente mais relevantes, entre eles a porosidade, as frações granulométricas e a densidade, sendo classificada como contínua e empírica, separada em dois modelos, nomeados aqui como modelo M1 e modelo M2. Ambas utilizam unicamente propriedades da fase sólida do solo.

O objetivo desta pesquisa foi avaliar o desempenho dessas funções propostas por Arya & Paris (1981) (programa Qualisolo) e por Walczak et al. (2006) (modelos M1 e M2) ao estimarem de forma indireta as curvas de retenção de nove tipos de solos localizados na bacia do arroio Taboão, Pejuçara/RS. Como referência para essa avaliação foram usados os resultados obtidos em laboratório com o emprego da Câmara de Richards e amostras indeformadas de solo.

## METODOLOGIA

### Área de Estudo

A área de estudo desta pesquisa localiza-se na bacia hidrográfica do arroio Taboão, situada no noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Brasil, no município de Pejuçara, em torno da latitude  $28^{\circ} 25' 24''\text{S}$  e longitude  $53^{\circ} 39' 21''\text{O}$  com 449 m de altitude. Esta bacia pertence à bacia do rio Uruguai como indicado na figura 1. A bacia do Taboão apresenta área de drenagem de 78 km<sup>2</sup>, considerando o exutório da bacia na estação fluviométrica (lat  $-28,439719$ , long  $-53,741561$ ) e tem no município de Pejuçara seu maior núcleo urbano.

O município possui uma área de 414,14 km<sup>2</sup> que abran-

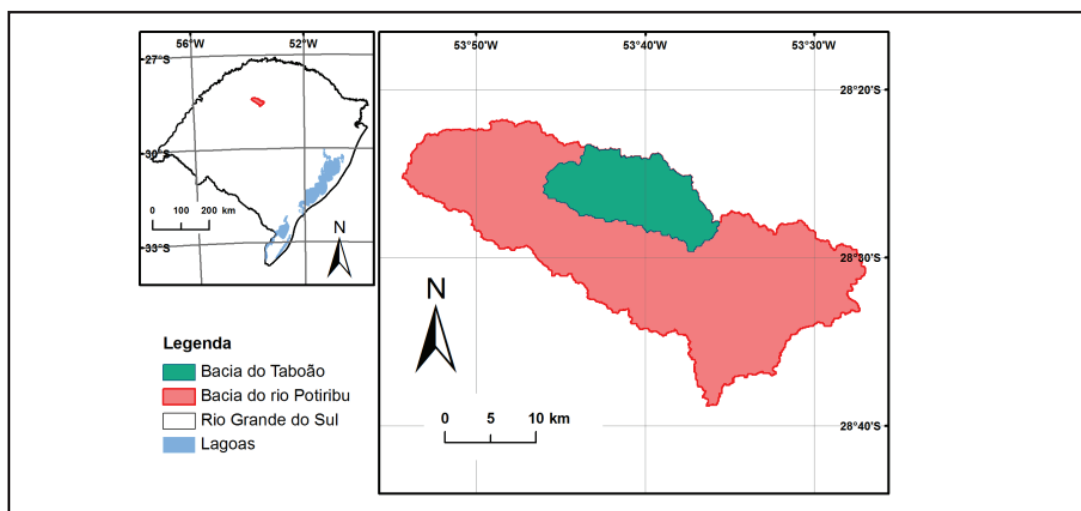


Figura 1 - Localização da bacia hidrográfica do arroio Taboão, noroeste do Estado do Rio Grande do Sul

Fonte: adaptado de Oliveira et al. (2011)

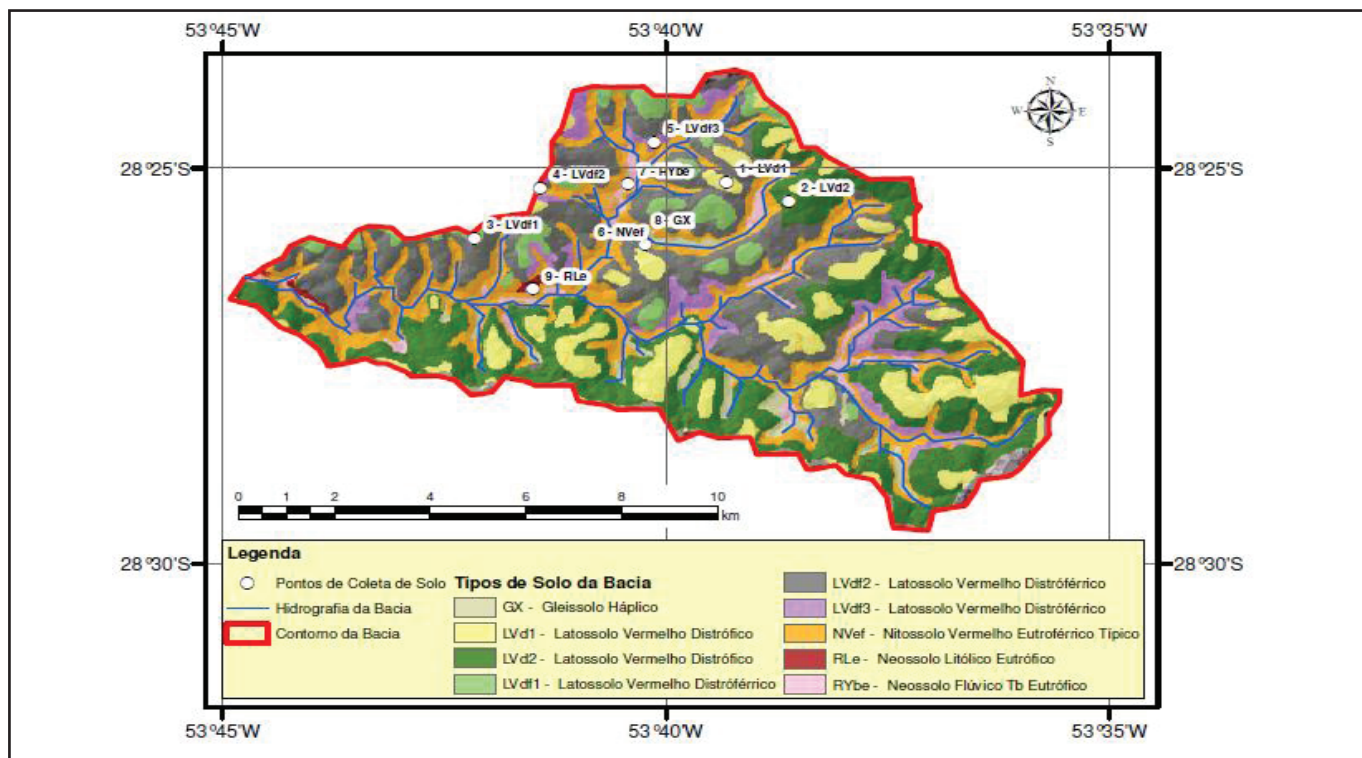


Figura 2 - Solos predominantes e localização dos pontos amostrados na bacia hidrográfica do arroio Taboão, Pejuçara/RS. Fonte: Adaptação de Carvalho et al. (1990), os quais realizaram o levantamento dos solos presentes na bacia e a identificação das unidades de mapeamento, sendo atualizado para a nova classificação dos solos (EMBRAPA, 2006)

ge mais de 90 % da área da bacia do Taboão (VIERO, 2004). O arroio Taboão é afluente do rio Potiribu, o qual por sua vez tem sua foz junto ao rio Ijuí, nas proximidades do município de Ijuí, conforme ilustra a figura 1. Esta bacia se localiza sobre o planalto médio basáltico que se estende entre as altitudes de 420 e 700 m. A declividade da bacia do Taboão é compreendida entre 3 e 10 %, podendo atingir até 15 %, sendo este relevo caracterizado como suave ondulado ou coxilhas (CASTRO, 1996; CASTRO et al. 1999).

A bacia do Taboão é considerada representativa desta região do planalto basáltico, por apresentar formação geológica, solos, relevo e clima muito característicos de toda esta região (Bordas & Borges, 1990). O principal uso do solo é a agricultura (58 %), sendo o cultivo de soja e milho no verão e aveia e trigo no inverno. Os tipos de solos predominantes na bacia do arroio Taboão são: Latossolos (LVd1, LVd2, LVdf1, LVdf2, LVdf3), Neossolos (RYbe, RLe), Nitossolos (NVef) e Gleissolos (GX) (Figura 2).

### Coleta das amostras de solo

Para cada tipo de solo, foram coletadas 3 amostras na parte média de cada uma das camadas de 0-0,25 m (superfície), 0,25-0,50 e 0,50-1 m, com exceção do solo RLe para o qual não foram obtidas amostras a 0,50-1 m. Portanto, um total de 78 amostras foi coletado, sendo representativas dos solos apresentados na figura 2. As coletas foram feitas utilizando cilindros

metálicos vazados de 5,3 cm de diâmetro e 2,9 cm de altura, que, devidamente acondicionados, foram transportados para o laboratório onde foram determinadas as curva de retenção com a Câmara de Richards. Paralelamente foram realizadas 78 coletas, nos mesmos pontos e nas mesmas camadas, de amostras deformadas para determinação das curvas granulométricas.

### Modelo proposto por Arya & Paris (1981) - Quali-solo: desenvolvimento e aplicação

O modelo de Arya e Paris (1981) determina de forma indireta a curva de retenção de água no solo a partir da sua similaridade com a curva de distribuição do tamanho de partículas (PERAZA, 2003). As equações que constituem o modelo, apresentadas a seguir, foram resolvidas com o emprego do software Qualisolo (VAZ et al., 1999; NAIME et al., 2001, 2004). O potencial mátrico ( $\psi_i$ , cm) é relacionado com o raio do poro ( $r_i$ ,  $\mu\text{m}$ ) através da equação de capilaridade.

$$\psi_i = \frac{2\sigma \cos \beta}{\rho_w g r_i} \quad (1)$$

onde  $\sigma$  é a tensão superficial na interface ar-água ( $\sigma = 0,0728 \text{ Nm}^{-1}$ ),  $\beta$  é o ângulo de contato entre a água e a superfície da parede sólida ( $\beta = 0$ ),  $\rho_w$  ( $1000 \text{ kg m}^{-3}$ ) é a densidade da água e  $g$  é a aceleração da gravidade ( $g = 9,81 \text{ m.s}^{-2}$ ). O cálculo da umidade com base na massa ( $\theta$ ) a partir da distribuição do ta-

manho das partículas contabiliza a contribuição de cada fração através da equação:

$$\theta = \phi \sum_{i=0}^1 w_i \quad (2)$$

onde  $\theta$  ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) é a porosidade e  $w_i$  ( $\text{kg kg}^{-1}$ ) é a  $i$ -ésima fração de massa de solo. No Qualisolo cada fração é calculada por meio de uma função sigmoideal ajustada aos dados de distribuição de tamanhos das partículas do solo. A porosidade do solo é estimada pela expressão  $\theta = 1 - (p_s/p_p)$  onde  $p_p$  ( $\text{kg.m}^{-3}$ ) é a densidade das partículas do solo, considerada a mesma para todas as frações de massa  $w_i$  e  $p_s$  ( $\text{kg.m}^{-3}$ ) é a densidade do solo. O raio dos poros ( $r_i$ ) é determinado a partir 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 por meio da equação:

$$r_i = R_i \sqrt{4en_i^{1-\alpha} / 6} \quad (3)$$

onde  $n_i$  é o número de partículas da classe  $i$  e  $e$  é a razão de vazios (volume de poros/volume de partículas). No Qualisolo,  $\alpha = 0,947 + 0,427 \cdot e^{-(0,129)}$  (VAZ et al., 2005). As equações para cálculo de  $n_i$  e  $e$  e adotadas no modelo de Arya e Paris (1981) são apresentadas a seguir.

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

$$e = \frac{\rho_p - \rho_s}{\rho_s} \quad (5)$$

O potencial mátrico do solo é calculado pela combinação das equações 1, 3, 4 e 5:

$$\psi_i = \frac{2\sigma}{\rho_w g R_i \sqrt{\frac{2(\rho_p - \rho_s)}{3\rho_s} \left( \frac{3w_i}{4\pi R_i^3 \rho_p} \right)^{1-\alpha}}} \quad (6)$$

Os pares de valores que compõem a curva de retenção são então obtidos pela aplicação das equações 2 e 6. As curvas granulométricas necessárias para aplicação do modelo foram obtidas no laboratório de sedimentos do Instituto de Pesquisas Hidráulicas - IPH utilizando o método das peneiras até o diâmetro de 0,063  $\mu\text{m}$  (areias) e o método da pipeta para obtenção das frações de silte, sendo a fração de argila obtida por cálculo (CAUDURO; DORFMAN, 1986). As frações silte e argila referem-se às faixas de 0,063 a 0,004 mm e <0,004 mm, respectivamente.

As amostras de solo foram submetidas a um pré-tratamento com água destilada e peróxido de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{O}_2$ ) para eliminação da matéria orgânica e posteriormente à dispersão

química utilizando Calgon (hexametáfosfato de sódio [ $\text{Na}_{16}\text{P}_{14}\text{O}_{43}$ ] e carbonato de sódio [ $\text{NaCO}_3$ ]) combinado com agitação mecânica em um agitador horizontal com esferas de vidro por um período de 12 h. As 78 curvas de distribuição granulométrica obtidas foram reduzidas a 26 curvas, através da granulometria média entre as três repetições de cada camada de solo.

## Modelos propostos por Walczak et al. (2006) M1 e M2: desenvolvimento e aplicação

Os modelos propostos por Walczak et al. (2006) relacionam a umidade do solo com os respectivos potenciais matriciais pelas propriedades da fase sólida do solo. Inicialmente foram desenvolvidos a partir de uma base de dados representada por oito solos do sudoeste da Espanha (clima mediterrâneo) e posteriormente verificados com solos de clima temperado da Polônia. Os resultados considerados satisfatórios dessa etapa teoricamente demonstraram a possibilidade de aplicá-los em outros solos que não aqueles que os originaram.

Na construção dos modelos, os seguintes parâmetros foram inicialmente considerados por Walczak et al. (2006): porosidade total obtida a partir da densidade das partículas e da densidade do solo ( $P1_{\text{tot}}$ , % vol); porosidade total obtida a partir da curva de retenção ( $P2_{\text{tot}}$ , % vol); densidade do solo ( $Bd$ ,  $\text{g cm}^{-3}$ ); frações granulométricas nas seguintes faixas: 2,0-0,2 mm (F1, %), 0,2-0,02 mm (F2, %), 0,02-0,002 mm (F3, %); teor de carbono orgânico (C, %); teor de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ , %); pH ( $\text{H}_2\text{O}$ ); área da superfície das partículas ( $Sg$ ,  $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$ ); e peso médio estatístico do diâmetro das partículas do solo ( $D$ , mm).

Foram determinadas as correlações parciais de cada uma destas propriedades com a umidade do solo ( $\theta$ ). As que apresentaram maior correlação ( $0,88 < R < 0,96$ ) foram definidas para compor os dois modelos de Walczak et al. (2006) descritos a seguir, obtidos por regressão linear múltipla:

$$\theta_p^1 = a_0 + a_1 F1 + a_2 F2 + a_3 P1_{\text{tot}} \quad (7)$$

$$\theta_p^2 = b_0 + b_1 F1 + b_2 F2 + b_3 Bd \quad (8)$$

onde  $\theta_p^1$  e  $\theta_p^2$  são os conteúdos de água preditos pelo modelo (%) e  $a_0, a_1, \dots, b_2$  e  $b_3$  são constantes. As equações 7 e 8 mostram que as maiores correlações foram obtidas com propriedades da fase sólida, no caso a porosidade, a densidade e as frações granulométricas. Essas equações foram aqui denominadas, respectivamente, de modelos M1 e M2, e os valores utilizados para aplicá-los estão apresentados nas Tabelas 1 e 2. As umidades resultantes das aplicações correspondem aos potenciais matriciais relacionados na Tabela 1.

As porosidades apresentadas na Tabela 2 foram obtidas a partir da relação  $\theta = 1 - (p_s/p_p)$ , sendo que a densidade das partículas foi considerada constante para todas as amostras de solo e igual a 2,65  $\text{g cm}^{-3}$ . As densidades foram determinadas com

Tabela 1 - Coeficientes dos modelos M1 e M2

Potencial Matricial (kPa)	Coeficientes M1				Coeficientes M2			
	$a_0$	$a_1$	$a_2$	$a_3$	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$
0,1	-17,18	-0,121	-0,0727	1,184	103,04	-0,0968	-0,0578	-45,36
0,32	-16,146	-0,132	-0,08	1,159	101,04	-0,0968	-0,0578	-44,4
1	-14,207	-0,144	-0,093	1,115	99,01	-0,122	-0,0797	-42,73
1,96	-11,783	-0,153	-0,109	1,057	95,54	-0,1323	-0,0965	-40,49
3,2	-8,698	-0,161	-0,124	0,975	90,24	-0,1424	-0,113	-37,3
9,80	2,207	-0,312	-0,192	0,736	76,48	-0,3018	-0,1866	-27,83
31	10,395	-0,337	-0,265	0,543	64,89	-0,3323	-0,2641	-20,3
490	20,506	-0,289	-0,297	0,159	36,31	-0,2907	-0,3015	-5,83
1470	16,849	-0,259	-0,278	0,187	35,19	-0,2601	-0,2815	-6,7

Fonte: Walczak et al. (2006)

Tabela 2 - Densidade (Bd ), porosidade total ( $P_{tot}$ ), teores de areia, Silte e argila utilizados nos modelos M1 e M2 de Walczak et al. (2006)

Solo	P (m)	Bd (g cm <sup>-3</sup> )	$P_{tot}$ (%)	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	Solo	P (m)	Bd (g cm <sup>-3</sup> )	$P_{tot}$ (%)	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)
LVd1	0-0,25	1,49	44	27	13	60	NVef	0-0,25	1,42	46	19	16	65
	0,25-0,5	1,47	45	24	12	64		0,25-0,5	1,50	43	13	11	76
	0,5-1,0	1,39	48	17	8	75		0,5-1,0	1,43	46	10	11	79
LVd2	0-0,25	1,74	34	33	13	54	RYbe	0-0,25	1,35	49	28	21	51
	0,25-0,5	1,48	44	24	9	67		0,25-0,5	1,34	49	18	20	62
	0,5-1,0	1,44	46	20	10	70		0,5-1,0	1,25	53	22	19	60
LVdf1	0-0,25	1,71	36	17	19	64	GX	0-0,25	1,60	40	33	19	48
	0,25-0,5	1,61	39	15	11	74		0,25-0,5	1,55	42	19	14	68
	0,5-1,0	1,58	40	12	13	75		0,5-1,0	1,45	45	22	23	55
LVdf2	0-0,25	1,81	32	34	17	49	RLe	0-0,25	1,44	46	49	12	39
	0,25-0,5	1,59	40	18	14	68		0,25-0,5	1,62	39	41	10	49
	0,5-1,0	1,50	43	22	23	55							
LVdf3	0-0,25	1,38	48	18	16	66							
	0,25-0,5	1,37	48	21	19	60							
	0,5-1,0	1,35	49	21	18	61							

P - camada do solo; Bd - densidade do solo;  $P_{tot}$  - porosidade total; Areia: diâmetro entre 2,0 a 0,0625 mm; Silte: diâmetro entre 0,0625 a 0,004 mm; Argila: diâmetro < 0,004 mm

as mesmas amostras que foram usadas na Câmara de Richards. Embora os modelos tenham sido originalmente desenvolvidos para outras faixas granulométricas já referidas anteriormente, os próprios autores (WALCZAK et al., 2006) e também Nemes e Rawls (2006) relataram bons resultados quando os modelos foram aplicados considerando areia, silte e argila caracterizadas por faixas granulométricas distintas das originais.

Os dados da Tabela 2, utilizados para gerar as 26 curvas de retenção pelos modelos M1 e M2, foram obtidos a partir de valores médios das três repetições das frações granulométricas, porosidade e densidade.

Convém ressaltar que estes modelos, M1 e M2 são empíricos, baseados em equações de regressão linear correlacionando algumas propriedades físicas do solo (densidade, porosidade e textura) com a retenção de água no solo. Já o software Qualisolo utiliza equações de base física considerando diferentes parâmetros para representar a textura do solo de forma mais detalhada como raio dos poros, razão de vazios, etc.

## Análise Estatística

Para avaliação do desempenho dos modelos, tendo como referência as curvas obtidas com o método clássico, foram utilizados os três coeficientes estatísticos relacionados a seguir: coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ); coeficiente de concordância ( $d$ ) (WILLMOTT, 1982) e coeficiente de desempenho ( $\hat{e}$ ) do modelo (CAMARGO; SENTELHAS, 1997). Os mesmos coeficientes foram usados por Lima et al. (2012) para avaliar o desempenho de sondas multisensores de capacitância para medição de umidade gravimétrica em Latossolos do cerrado.

O coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ) (equação 9) varia de -1 a 1 e indica o grau de relação linear entre duas variáveis, no caso as umidades estimadas pelos modelos e as umidades obtidas em laboratório.

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (9)$$

Onde  $r$  é o coeficiente de correlação de Pearson;  $n$  é o número de amostras;  $x_i$  e  $y_i$  são os valores das variáveis  $x$  e  $y$ ;  $\bar{x}$  e  $\bar{y}$  são as médias dos valores de  $x$  e  $y$ .

O coeficiente de concordância ( $d$ ) de Willmott (1982) (equação 10) varia de 0 a 1 e indica o grau de afastamento dos valores estimados pelos modelos em relação aos obtidos experimentalmente, ou seja, avalia a relação entre a linha de tendência linear gerada entre valores estimados (modelos) e observados (laboratório) e a reta 1:1.

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)^2} \quad (10)$$

Onde  $d$  é o coeficiente de concordância de Willmott (1982);  $P_i$  é o valor estimado;  $O_i$  é o valor experimental e  $\bar{O}$  é a média dos valores experimentais.

O índice de desempenho ( $c$ ) de Camargo e Sentelhas (1997) (equação 11) corresponde ao produto dos dois índices anteriores.

$$c = r \cdot d \quad (11)$$

Onde  $c$  é o índice de desempenho;  $r$  é o coeficiente de correlação de Pearson e  $d$  é o coeficiente de concordância de Willmott (1982). As faixas de valores do índice  $c$  indicativas do desempenho do modelo são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Critério de desempenho do modelo

Índice de Desempenho (c)	Desempenho
> 0,85	Ótimo
0,76 - 0,85	Muito bom
0,66 - 0,75	Bom
0,61 - 0,65	Mediano
0,51 - 0,6	Ruim
0,41 - 0,50	Muito ruim
< 0,4	Péssimo

Fonte: Camargo e Sentelhas (1997)

Como as pressões aplicadas nos ensaios com a Câmara de Richards não foram coincidentes com os potenciais matriciais resultantes dos modelos, todas as curvas estimadas foram utilizadas como entrada no aplicativo RETC (van GENUCHTEN et al., 1991), o que permitiu ajustar o modelo proposto por van Genuchten (1980) a cada uma delas. Isso se fez necessário pelo tipo de funções utilizadas nesse trabalho, que se caracterizam por apresentarem resultados em potenciais matriciais específicos. Assim sendo, a análise estatística foi feita com base nas equações que passaram a representar as curvas estimadas analiticamente e nas curvas experimentais.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

As curvas de retenção (Figura 4) geradas pelos três modelos avaliados em geral subestimaram os teores de umidade nas três camadas consideradas, com exceção do solo N Vef para o qual foram obtidos resultados mais satisfatórios e do solo GX para a camada de 0,25-0,5 m, sendo este último para os modelos M1 e M2. As maiores diferenças ocorreram nos solos LVdf1, LVdf2, LVdf3 e RLe. Todas as simulações com o modelo M2 forneceram umidades mais elevadas que o M1. Para o solo N Vef observou-se que o programa Qualisolo (Q) gerou melhores estimativas das umidades para as menores potenciais matriciais (6 e 10 kPa) enquanto que os modelos M1 e M2 estimaram melhor para as altas tensões (101 e 303 kPa).

A Tabela 4 apresenta a análise estatística de desempenho dos modelos. Os coeficientes de correlação de Pearson ( $r$ ), de concordância (WILLMOTT, 1982) e de desempenho (CAMARGO; SENTELLHAS, 1997) indicam que os modelos M1 e M2 foram superiores ao de Arya e Paris (1981) em 65 % dos casos, sendo que entre eles, o modelo M2 foi melhor que o M1 para todos os solos, exceto para o solo RYbe na camada de 0,50-1 m. Avaliando os piores desempenhos dos três modelos, percebe-se que o modelo de Arya e Paris (1985) resultou em mais casos com desempenhos muito ruim ou péssimo (13 casos), seguido do modelo M1 (9 casos).

Observa-se também que quando um dos modelos de Walczak et al. (2006) apresentou um bom desempenho, o de Arya e Paris (1981) teve desempenho insatisfatório, e vice-versa. Em geral, bons resultados foram obtidos pelos modelos M1 e M2 para os solos LVd2, LVdf1, LVdf2, LVdf3 e RLe, embora para algumas camadas não tenha sido verificado o mesmo comportamento das umidades obtidas pelo método clássico.

Em artigos recentes Nascimento et al. (2010), Mohammadi e Vanclooster (2011) e Rezaee et al. (2011) também compararam curvas de retenção de água no solo obtidas pelo modelo de Arya e Paris (1981) com as curvas obtidas em laboratório. Os primeiros autores avaliaram o comportamento do modelo em um solo de textura arenosa (Neossolo Quartzarênico) localizado em Petrolina - PE, e constataram que as umidades foram superestimadas quando comparadas com os valores de laboratório, o contrário do ocorrido neste trabalho onde os solos analisados são argilosos.

Já Mohammadi e Vanclooster (2011) testaram o modelo para 42 solos de diferentes classes texturais com teores médios de areia e argila de 22,5% e 26,4%, respectivamente. Eles obtiveram, em alguns casos, resultados que também subestimaram os valores de umidade na região da curva correspondente aos maiores potenciais matriciais. Rezaee et al. (2011) mostraram que os resultados do modelo são fortemente dependentes dos valores adotados para o parâmetro de escala  $\alpha$ . Os autores identificaram que a estimativa de  $\alpha$ , como é feita no Qualisolo, induz que os valores de umidade sejam subestimados tanto para valores altos como para valores baixos de potencial matricial.

Em outros artigos, Lamorski et al. (2008) e Wahren et al. (2012) avaliaram os modelos propostos por Walczak et al. (2006) (M1 e M2). Os primeiros desenvolveram "máquinas de suporte vetorial" e as compararam com os modelos de Walczak

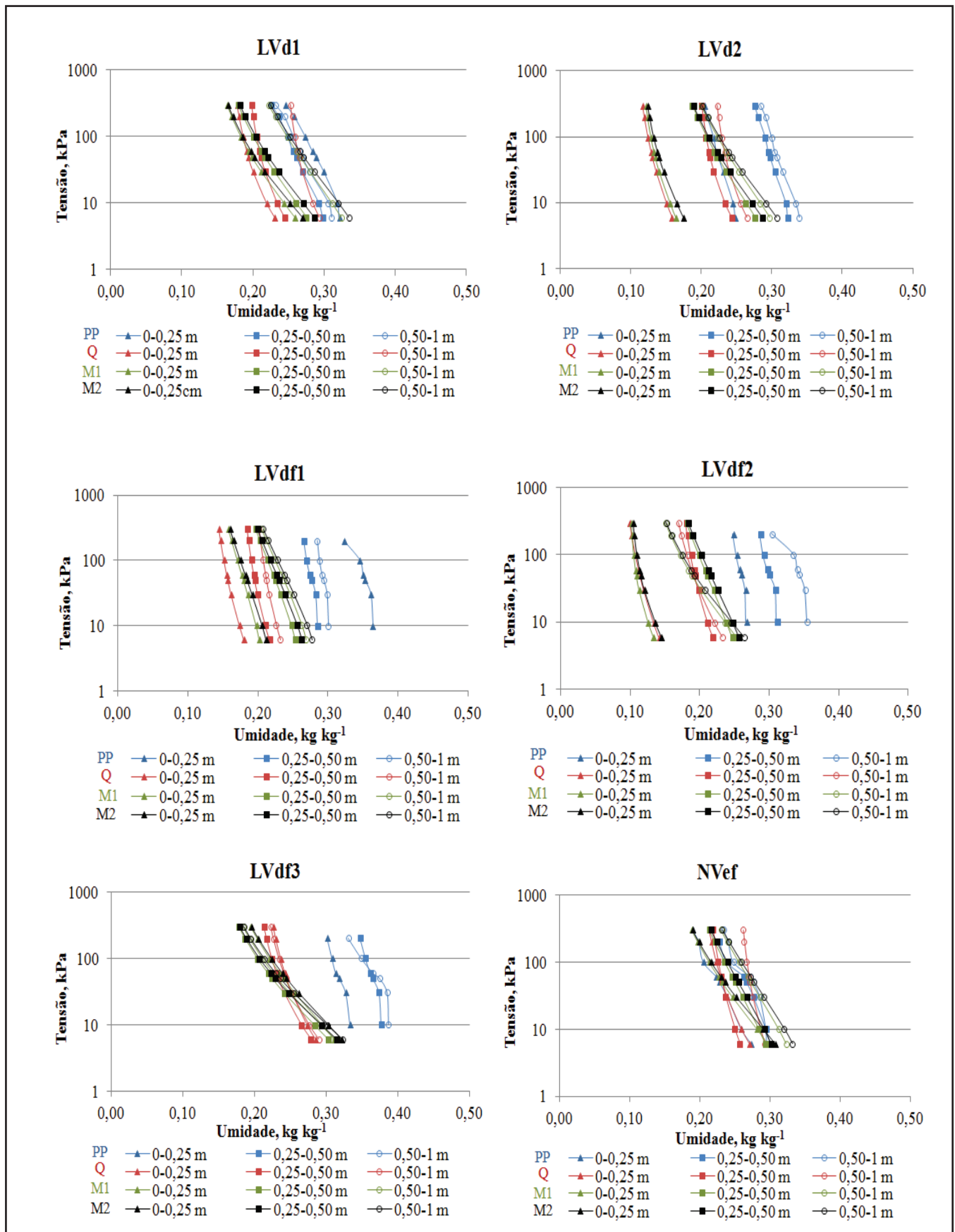


Figura 4 - (continua...) Curvas de retenção de água obtidas por diferentes métodos. PP-Câmara de Richard (laboratório); Q-Qualisolo (Arya e Paris (1981); M1 e M2-modelos 1 e 2 (Walczak et al., 2006)

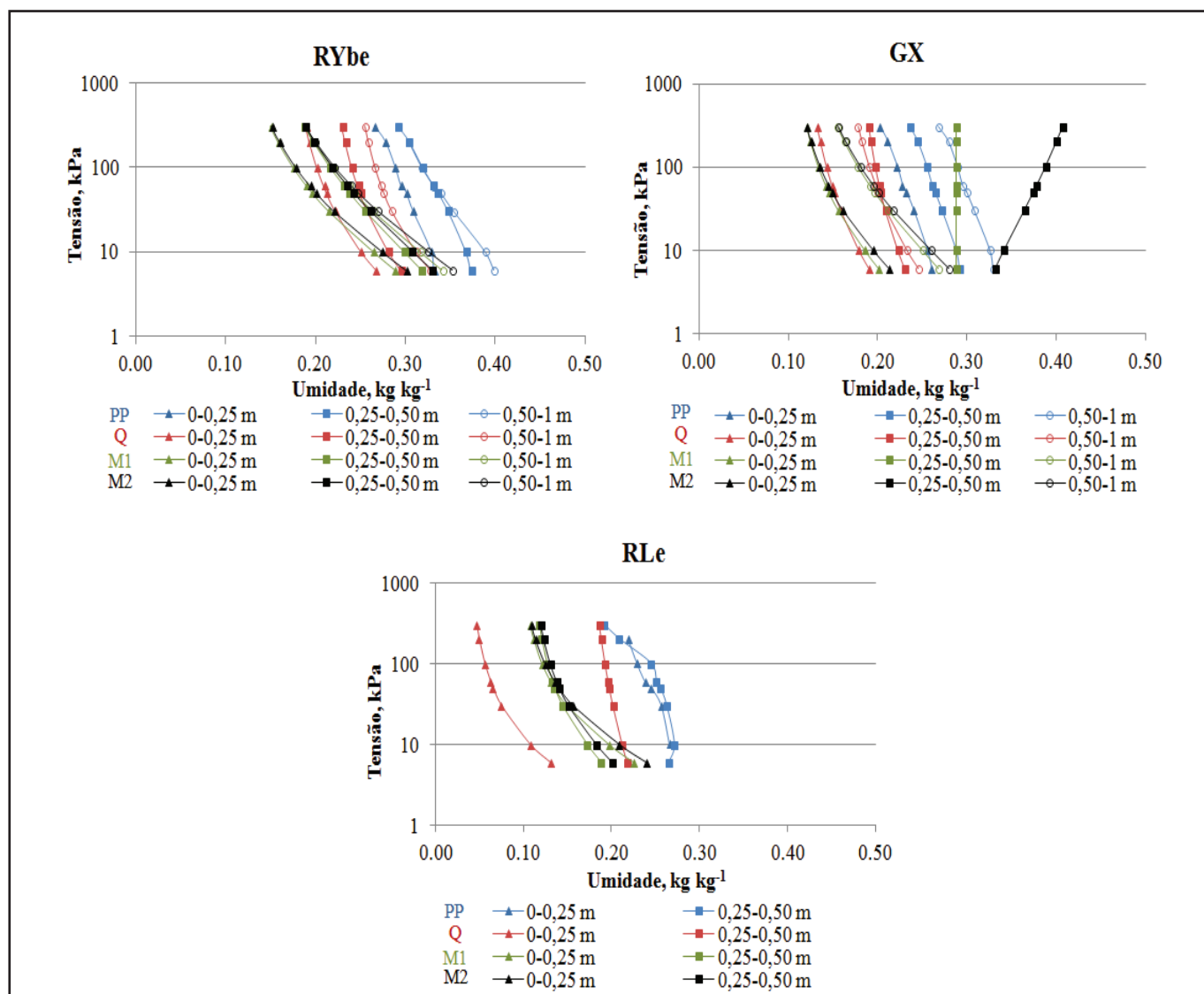


Figura 4 - (continuação). Curvas de retenção de água obtidas por diferentes métodos. PP-Câmara de Richard (laboratório); Q-Qualisolo (Arya & Paris (1981); M1 e M2-modelos 1 e 2 (Walczak et al., 2006)

et al. (2006) e com redes neurais para determinação de curvas de retenção.

Os valores de  $R^2$  obtidos a partir dos resultados dos modelos de Walczak et al. (2006) foram substancialmente superiores aos outros dois métodos utilizados. Essa constatação vai ao encontro dos resultados obtidos nesse trabalho, onde os modelos M1 e M2 se mostraram superiores ao modelo de Arya e Paris (1981). Wahren et al. (2012) testaram três funções de pedotransferência, incluindo os modelos de Walczak et al. (2006), para obtenção de informações espaciais do solo na forma de mapas, relacionando suas propriedades físicas com seus usos. Todos os modelos forneceram resultados considerados válidos quando da estimativa da umidade do solo em capacidade de campo.

A figura 5 apresenta as relações entre o desempenho do modelo e as propriedades do solo obtidas experimentalmente para todos os solos e camadas consideradas. Para o programa Qualisolo (Q) não foi verificada nenhuma correlação do desempenho do modelo com as propriedades físicas do solo (frações

granulométricas, porosidade, densidade). Já para os modelos M1 e M2 observou-se que os melhores desempenhos foram obtidos para as amostras de solo com menores densidades (consequentemente com maiores porosidades), baixos teores de areia e altos teores de argila. A fração silte não altera o desempenho de nenhum dos modelos testados e por isso seu gráfico foi aqui omitido ( $R^2 < 0,1$ ). Os maiores coeficientes de ajuste da regressão linear foram obtidos para porosidade ( $R^2 = 0,58$ ) e para densidade ( $R^2 = 0,59$ ).

Uma razão para este resultado é que a porosidade é um importante parâmetro para contabilizar a grande variação de umidade para potenciais mais próximos à saturação (fluxo nos macroporos), uma vez que o armazenamento de água nesta faixa mais úmida da curva de retenção é fortemente governado pela estrutura do solo e não pela textura. Por outro lado, esta última influencia mais fortemente o fluxo de água nos micro e mesoporos sob potenciais mais negativos (MERMOUD; XU, 2006). Como nos gráficos da Figura 4 estão representados apenas os potenciais até 1000 kPa ( $\approx 1$  atm), isto explica por-



Tabela 4 - Coeficiente de correlação de Pearson ( $r$ ), coeficiente de concordância ( $\rho$ ), índice de desempenho ( $i$ ) e desempenho (Camargo & Sentelhas, 1997) para as curvas de retenção de água no solo obtidas pelos modelos utilizados

Solo	P (m)	$r^0$	$r^1$	$r^2$	$\rho^0$	$\rho^1$	$\rho^2$	$\rho^3$	$\rho^4$	$\rho^5$	$c^0$	$c^1$	$c^2$	Desem- penho <sup>0</sup>	Desem- penho <sup>1</sup>	Desem- penho <sup>2</sup>
<b>LVd1</b>	0-0,25	0,926	0,984	0,983	0,458	0,509	0,557	0,42	0,50	0,55	0,42	0,50	0,55	muito ruim	muito ruim	ruim
	0,25-0,50	0,926	0,988	0,987	0,458	0,609	0,659	0,42	0,60	0,65	0,42	0,60	0,65	muito ruim	ruim	mediano
	0,50-1	0,973	0,993	0,993	0,960	0,941	0,950	0,93	0,94	0,94	0,94	0,94	0,94	ótimo	ótimo	ótimo
<b>LVd2</b>	0-0,25	0,973	0,975	0,976	0,834	0,284	0,300	0,81	0,28	0,30	0,81	0,28	0,30	muito bom	péssimo	péssimo
	0,25-0,50	0,958	0,990	0,989	0,209	0,629	0,683	0,20	0,62	0,68	0,20	0,62	0,68	péssimo	mediano	bom
	0,50-1	0,972	0,992	0,991	0,236	0,765	0,812	0,23	0,76	0,80	0,23	0,76	0,80	péssimo	muito bom	muito bom
<b>LVdf1</b>	0-0,25	0,949	0,992	0,994	0,729	0,358	0,381	0,69	0,36	0,38	0,69	0,36	0,38	bom	péssimo	péssimo
	0,25-0,50	0,986	0,989	0,991	0,516	0,526	0,567	0,51	0,52	0,56	0,51	0,52	0,56	ruim	ruim	ruim
	0,50-1	0,992	0,988	0,990	0,120	0,600	0,647	0,12	0,59	0,64	0,12	0,59	0,64	péssimo	ruim	mediano
<b>LVdf2</b>	0-0,25	0,987	0,956	0,966	0,535	0,244	0,257	0,53	0,23	0,25	0,53	0,23	0,25	ruim	péssimo	péssimo
	0,25-0,50	0,991	0,995	0,995	0,054	0,491	0,527	0,05	0,49	0,53	0,05	0,49	0,53	péssimo	muito ruim	ruim
	0,50-1	0,479	0,986	0,985	0,473	0,472	0,514	0,23	0,47	0,51	0,23	0,47	0,51	péssimo	muito ruim	ruim
<b>LVdf3</b>	0-0,25	0,995	0,989	0,988	0,465	0,794	0,825	0,46	0,79	0,82	0,46	0,79	0,82	muito ruim	muito bom	muito bom
	0,25-0,50	0,990	0,986	0,985	0,263	0,709	0,742	0,26	0,70	0,73	0,26	0,70	0,73	péssimo	bom	bom
	0,50-1	0,944	0,986	0,985	0,334	0,755	0,783	0,31	0,74	0,77	0,31	0,74	0,77	péssimo	bom	muito bom
<b>NVef</b>	0-0,25	0,984	0,990	0,989	0,991	0,726	0,768	0,97	0,72	0,76	0,97	0,72	0,76	ótimo	bom	muito bom
	0,25-0,50	0,984	0,994	0,994	0,990	0,774	0,837	0,97	0,77	0,83	0,97	0,77	0,83	ótimo	muito bom	muito bom
	0,50-1	0,957	0,994	0,994	0,905	0,996	0,978	0,87	0,96	0,97	0,87	0,96	0,97	ótimo	ótimo	ótimo
<b>RYbe</b>	0-0,25	0,960	0,979	0,978	0,459	0,586	0,620	0,44	0,57	0,61	0,44	0,57	0,61	muito ruim	ruim	mediano
	0,25-0,50	0,954	0,988	0,987	0,445	0,792	0,814	0,42	0,78	0,80	0,42	0,78	0,80	muito ruim	muito bom	muito bom
	0,50-1	0,964	0,984	0,983	0,791	0,814	0,813	0,76	0,80	0,80	0,76	0,80	0,80	muito bom	muito bom	muito bom
<b>GX</b>	0-0,25	0,984	0,973	0,974	0,852	0,337	0,355	0,84	0,33	0,35	0,84	0,33	0,35	muito bom	péssimo	péssimo
	0,25-0,50	0,984	0,994	-0,993	0,749	0,541	0,128	0,74	0,54	-0,13	0,74	0,54	-0,13	bom	ruim	péssimo
	0,50-1	0,981	0,985	0,984	0,282	0,537	0,578	0,28	0,53	0,57	0,28	0,53	0,57	péssimo	ruim	ruim
<b>RLe</b>	0-0,25	0,993	0,956	0,957	0,618	0,357	0,391	0,61	0,34	0,37	0,61	0,34	0,37	mediano	péssimo	péssimo
	0,25-0,50	0,868	0,960	0,962	0,874	0,315	0,334	0,76	0,30	0,32	0,76	0,30	0,32	muito bom	péssimo	péssimo

0 Qualisolo (Arya & Paris (1981); 1 Modelo M1 (Walczak et al., 2006); 2 Modelo M2 (Walczak et al., 2006); P: camada do solo

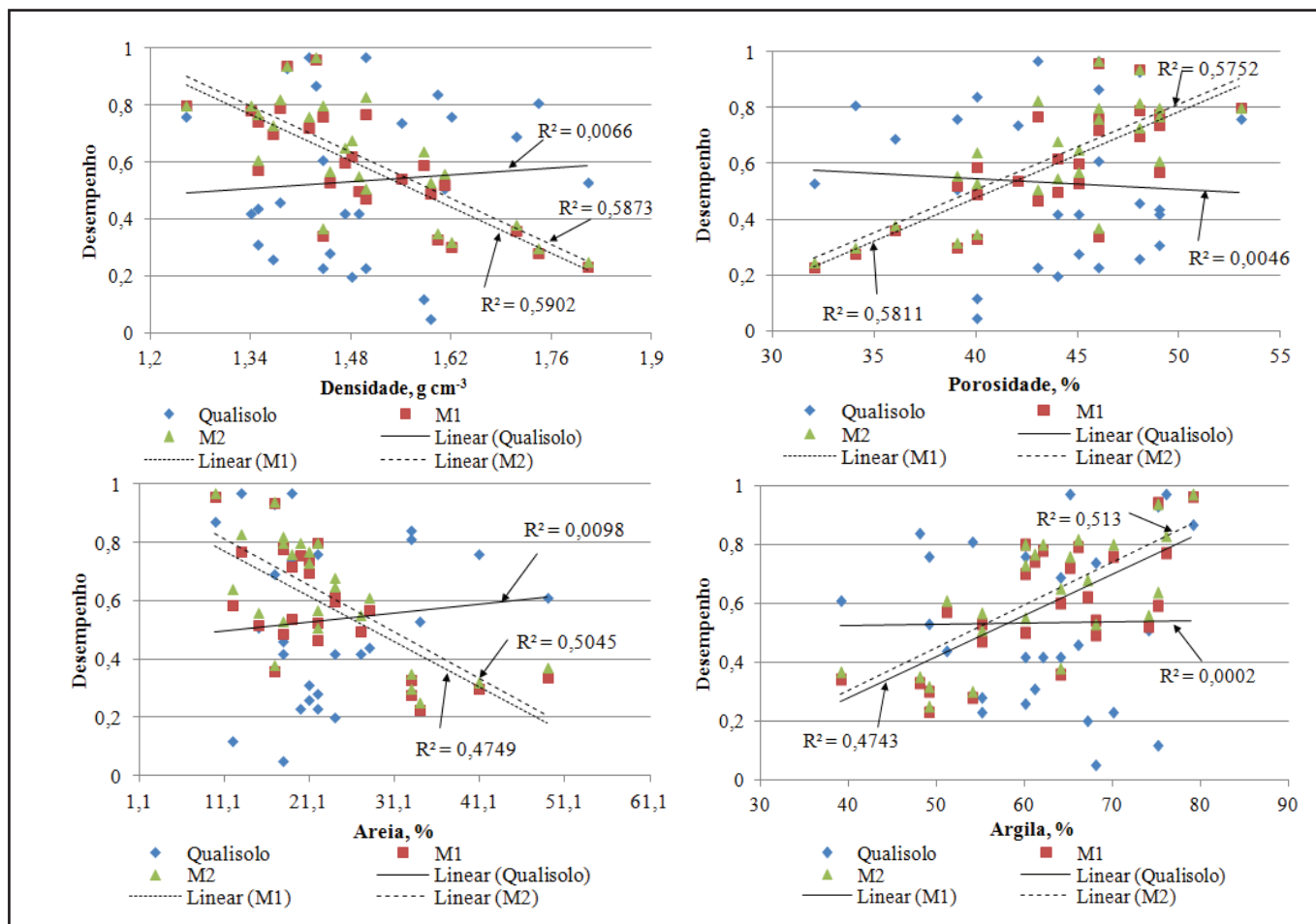


Figura 5 - Comportamento do desempenho dos modelos com relação às propriedades físicas do solo

que não foi encontrado nenhum padrão de forte correlação do desempenho dos modelos com as frações granulométricas. Esta análise pode ser confirmada também pela Tabela 2, onde verifica-se não haver nenhuma correlação entre a porosidade dos dados e a textura do solo.

A baixa correlação do software Qualisolo (Q) com as propriedades físicas analisadas sugere que as relações matemáticas utilizadas neste modelo não fazem uma boa associação entre as características dos solos e a curva de retenção. Além disso, para todos os modelos aqui analisados, algumas características importantes do solo não foram incorporadas aos mesmos, tais como matéria orgânica e pH. O teor de matéria orgânica, por exemplo, não considerado de forma explícita nos modelos avaliados nesse trabalho, é considerado importante em várias outras funções de pedotransferência devido a um aumento na capacidade de retenção de água (AHUJA et al., 1985; BRADY, 1989; RAWLS et al., 2003). Adicionalmente, alguns autores que incorporaram aos seus modelos a umidade de saturação obtiveram melhores ajustes (BØRGESEN et al., 2008; SANTRA; DAS, 2008; MANYAME et al., 2007).

Por outro lado, enquanto o modelo de Walczak et al. (2006) (M1 e M2) é caracterizado por parâmetros totalmente empíricos, o modelo de Arya e Paris (1981) (Qualisolo-Q), mesmo que tendo embasamento físico, ao introduzir o parâmetro

de escala  $\alpha$ , deixa de ser integralmente conceitual. A presença de parâmetros empíricos torna os modelos dependentes das bases de dados que foram utilizadas para calibrá-los e testá-los (SCHAAP et al., 2004).

De maneira geral, os resultados indicam que o modelo M2 é melhor do que o M1, e que os piores desempenhos foram obtidos pelo modelo de Arya e Paris (1981). Uma possível causa para o melhor desempenho do modelo M2 com relação ao M1 é que o primeiro emprega a densidade do solo, enquanto que o segundo utiliza a porosidade. A influência destes dois parâmetros sobre as estimativas da curva de retenção de água no solo foi analisada por Melo e Pedrollo (2015) para 228 solos ao redor do mundo contidos no banco de dados UNSODA, utilizando redes neurais artificiais (RNAs). Na análise de sensibilidade realizada pelos mesmos, verificou-se que a densidade do solo é a propriedade do solo que mais influenciou o desempenho dos modelos testados. Enquanto a densidade do solo melhorou a eficiência do modelo em até 46%, a porosidade contribuiu com no máximo 17,8%. Isto corrobora que o modelo M2 pode ser superior ao M1 devido às diferentes influências que cada uma destas propriedades tem sobre as estimativas da curva de retenção de água.

## CONCLUSÕES

Em geral, tanto o modelo de Arya e Paris (1981) quanto o de Walczak et al. (2006) subestimam as umidades para a faixa de potenciais matriciais analisada (até 1000 kPa), com exceção do solo Nvfe para o qual resultados mais satisfatórios foram obtidos.

Em 65 % das amostras analisadas os modelos M1 e M2 forneceram desempenhos superiores ao modelo de Arya e Paris (1981), sendo que entre eles, o modelo M2 foi melhor que o M1 para todos os solos, exceto para o solo RYbe na camada de 0,50-1 m. Para todas as simulações o modelo M2 calculou valores de umidade maiores do que o modelo M1, o que fez com que seus resultados tenham sido mais próximos dos obtidos em laboratório.

Os desempenhos dos modelos M1 e M2 estão bem relacionados com as propriedades físicas do solo, sendo este comportamento mais acentuado para a estrutura do solo (porosidade e densidade) do que para a textura (frações de areia e argila). Porém para a fração silte, nenhuma correlação foi encontrada. Já para o modelo de Arya e Paris (1981) nenhuma correlação foi encontrada nem para a estrutura ou para a textura do solo.

Também verificou-se que os modelos de Walczak et al. (2006) tiveram bom desempenho em solos argilosos, ainda que em suas formulações as frações de argila não são consideradas diretamente.

Comparando os modelos, pode-se concluir que nenhum deles foi considerado satisfatório para todos os solos em todas as profundidades consideradas. Além disso, os modelos testados M1 e M2 representaram adequadamente a curva de retenção de água no solo, fornecendo resultados comparáveis e até superiores aos obtidos pela metodologia clássica (modelo de ARYA e PARIS, 1981).

## REFERÊNCIAS

AHUJA, L.R.; NANEY, J.W.; WILLIAMS, R.D. Estimating soil water characteristics from simpler properties or limited data. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v. 49, p. 1100-1105, 1985.

ARYA, L.M.; PARIS, J.F. A physico-empirical model to predict soil moisture characteristics from particle-size distribution and bulk density data. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v. 45, p. 1023-1030, 1981.

ARYA, L.M.; LEIJ, F.J.; VAN GENUCHTEN, M.T.; SHOUSE, P.J. Scaling parameter to predict the soil-water characteristic from particle-size distribution data. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v. 63, p. 510-519, 1999.

BAKER, L.; ELLISON, D. Optimisation of pedotransfer functions using an artificial neural network ensemble method. *Geoderma*, v. 144, p. 212-224, 2008.

BORDAS, M.P.; BORGES, A.L. Escolha de bacias representativas e experimentais para estudo da erosão no planalto basáltico sul-americano. In: CONGRESSO BRASILEIRO E ENCONTRO

NACIONAL DE PESQUISA SOBRE CONSERVAÇÃO DO SOLO, 8., Londrina, 1990. *Anais...* Londrina, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1990. p.15-16

BØRGENSEN, C.D.; IVERSEN, B.V.; JACOBSEN, O.H.; SCHAAP, M.G. Pedotransfer functions estimating soil hydraulic properties using different soil parameters. *Hydrol. Process*, v. 22, p. 1630-1639, 2008.

BOUMA, J. Using soil survey data or quantitative land evaluation. In: STEWART, B.A., ed. *Advance in soil science*. New York: Springer-Verlag New York, 1989. v. 9.

BRADY, N.C. *Natureza e Propriedades do Solos*. 7ª ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 1989. 898 p.

CAMARGO, A.P.; SENTELHAS, P.C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. *R. Bras. Agrometeorol.*, v. 5, p. 89-97, 1997.

CARVALHO, A.P.; ABRÃO, P.U.R.; FASOLO, P.J.; POTTER, R.J. *Levantamento semidetalhado dos solos da bacia do arroio Taboão (Pejuçara/Ijuí RS)*. Publicação interna. Porto Alegre: IPH/UFRGS, 1990. 41p. + Mapa 1:25.000.

CASTRO, N.M.R. Ruissellement et l'érosion sur des bassins versants de grandes cultures du plateau basaltique au sud du Brésil. 1996. 224f. Tese (Doutorado) – ULP (Rio Grande do Sul), Strasbourg, 1996.

CASTRO, N.M.R.; AUZET, V.; CHEVALLIER, P.; LEPRUN, J.C. Land use change effects on runoff and erosion from plot to catchment scale on the basaltic plateau of Southern Brazil. *Hydrol. Proc.*, v. 13, p. 1623-1628, 1999.

CAUDURO, F. A.; DORFMAN, R. Manual de Ensaios de Laboratório de Campo para Irrigação e Drenagem. Colab. José Bofill Santaló. Porto Alegre: PRONIPH - UFRGS, 1986. 216 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de Métodos de Análise de Solos. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa-CNPS, 1997. 212p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema brasileira do classificação de solos. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa-SPI, 2006. 306p.

GHANBARIAN-ALAVIJEH, B.; MILLÁN, H. Point pedotransfer functions for estimating soil water retention curve. *Int. Agrophysics*, v. 24, p. 243-251, 2010.

LAMORSKI, K.; PACHEPSKY, Y.; STAWINSKI, C.; WALCZAK, R.T. Using support vector machines to develop pedotransfer functions for water retention of soils in Poland.

Soil Sci. Soc. Am. J., v. 72, p. 1243-1247, 2008.

LIMA, J.E.F.W.; SILVA, E.M.; KOIDE, S.; SANTOS, R.M. Avaliação do desempenho de sonda de capacitância no monitoramento da umidade de Latossolos do cerrado em condições de campo. R. Bras. Rec. Hídric., v. 17, p. 23-32, 2012.

MANYAME, C.; MORGAN, C.L.; HEILMAN, J.L.; FATONDJI, D.; GERARD, B.; PAYNE, W.A. Modeling hydraulic properties of sandy soils of Niger using pedotransfer functions. Geoderma, v. 141, n. 3-4, p. 407-415, 2007.

MELO, T.M.; PEDROLLO, O.C. Artificial Neural Networks for Estimating Soil Water Retention Curve Using Fitted and Measured Data. Applied and Environmental Soil Science, 2015, Article ID 535216, 16 pages, 2015.

MERMOUD, A.; XU, D. Comparative analysis of three methods to generate soil hydraulic functions. Soil Till. Res., v. 87, p. 89-100, 2006.

MOHAMMADI, M.H.; VANCLOOSTER, M. Predicting the soil moisture characteristic curve from particle size distribution with a simple conceptual model. Vadose Zone J., v. 10, p. 594-602, 2011.

NAIME, J.M.; VAZ, C.M.P.; MACEDO, A. Automated soil particle size analyzer based on gamma-ray attenuation. Computers Electron. Agric., v. 31, p. 295-304, 2001.

NAIME, J.M.; SHINYA, V.T.; VAZ, C.M.P. Programa para estimativa indireta da curva de retenção da água no solo. Comunicado Técnico 60. São Carlos, 2004.

NASCIMENTO, P.S.; BASSOI, L.H.; PAZ, V.P.S.; VAZ, C.M.P.; NAIME, J.M.; MANIERI, J.M. Estudo comparativo de métodos para a determinação da curva de retenção de água no solo. Irriga, v. 15, p. 193-207, 2010.

NEMES, A.; RAWLS, W.J. Evaluation of different representations of the particle-size distribution to predict soil water retention. Geoderma, v. 132, p. 47-58, 2006.

OLIVEIRA, G.G.; PEDROLLO, O.; CASTRO, N.M. R. Metodologia de análise de sensibilidade e exclusão de variáveis de entrada em simulação hidrológica por redes neurais artificiais (RNAs): resultados preliminares. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, XIX. 2011, Maceió. Anais... Maceió, Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2011. p.1-19.

PACHEPSKY, Y.; RAWLS, W. Accuracy and reliability of pedotransfer functions as affected by grouping soils. Soil Sci. Soc. Am. J., v. 63, p. 1748-1757, 1999.

PERAZA, J.E.S. Retenção de Água e Pedofunções para Solos do Rio Grande do Sul. 2003. 118f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

RAWLS, W.J.; PACHEPSKY, Y.A.; RITCHIE, J.C.; SOBECKI,

T.M.; BLOODWORTH, H. Effect of soil carbon on soil water retention. Geoderma, v. 116, p. 61-76, 2003.

REZAEI, L.; SHABANPOUR, M.; DAVATGAR, N. Estimating the soil water retention curve from soil particle size distribution using the Arya and Paris model for Iranian soils. Turk J. Agric. For., v. 35, p. 649-657, 2011.

SANTRA, P.; DAS, B.S. Pedotransfer functions for soil hydraulic properties developed from a hilly watershed of Eastern India. Geoderma, v. 146, p. 439-448, 2008.

SCHAAP, M.G.; NEMES, A.; VAN GENUCHTEN, M. T. Comparison of models for indirect estimation of water retention and available water in surface soils. Vadose Zone J., v. 3, p. 1455-1463, 2004.

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

VAN GENUCHTEN, M.T.; LEIJ, F.J.; YATES, S.R. The RETC Code for Quantifying the Hydraulic Functions of Unsaturated Soils. Riverside, CA, 1991. 93p.

VAZ, C.M.P.; IOSSI, M.F.; NAIME, J.M.; MACEDO, A.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; COOPER, M. Validation of the Arya and Paris water retention model for Brazilian Soils. Soil Sci. Soc. Am. J., v. 69, p. 577-583, 2005.

VAZ, C.M.P.; NAIME, J.M.; MACEDO, A. Soil particle size fractions determined by gamma-ray attenuation. Soil Sci., v. 164, p. 403-410, 1999.

VIEIRA, M.L. Propriedades físico-hídrico-mecânicas do solo e rendimento de milho submetido a diferentes sistemas de manejo. 2006. 115f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2006.

VIERO, A.C. Análise da geologia, geomorfologia e solos no processo de erosão por voçorocas: bacia do Taboão, RS. 2004. 129f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

WAHREN, F.T.; TARASIUK, M.; MYKHNOVYCH, A.; KIT, M.; FEGER, K.H.; SCHWÄRZEL, K. Estimation of spatially distributed soil information: dealing with data shortages in the Western Bug Basin, Ukraine. Environ. Earth Sci., v. 65, p. 1501-1510, 2012.

WALCZAK, R.T.; MORENO, F.; STAWINSKI, C.; FERNANDEZ, E.; ARRUE, J. L. Modeling of soil water retention curve using soil solid phase parameters. J. Hydrol., v. 329, p. 527-533, 2006.

WILLMOTT, C.J. Some comments on the evaluation of model performance. Bull. Am. Meteorol. Soc., v. 63, p. 1309-1313, 1982