

ÁLVARO LUIZ CARVALHO NEBEL

**Funções de pedotransferência e estrutura de
variabilidade espacial da retenção de água em solos de
várzea do Rio Grande do Sul**

Tese apresentada ao Programa de
Pós - Graduação em Agronomia da
Universidade Federal de Pelotas,
como requisito parcial à obtenção
do título de Doutor em Ciências
(área do conhecimento: Solos).

Orientador: Prof. Dr. Luís Carlos Timm

Co-Orientadores: Prof. Dr. Eloy Antonio Pauletto
Prof. Dr. Ledemar Carlos Vahl

Pelotas, 2009.

Dados de catalogação na fonte:
(Marlene Cravo Castillo – CRB-10/744)

N359f Nebel, Álvaro Luiz Carvalho

Funções de pedotransferência e estrutura de
variabilidade espacial da retenção de água em solos de
várzea do Rio Grande do Sul / Álvaro Luiz Carvalho Nebel. -
Pelotas, 2009.

140f. : il.

Tese(Doutorado) –Programa de Pós-Graduação em
Solos. Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel. Universidade

ÁLVARO LUIZ CARVALHO NEBEL

**Funções de pedotransferência e estrutura de variabilidade
espacial da retenção de água em solos de várzea do Rio
Grande do Sul**

Banca examinadora:

Prof. Dr. Luís Carlos Timm (Orientador, Presidente)
(DER / FAEM / UFPEL)

Prof. PhD. Dalvan José Reinert (Examinador)
(CCR / UFSM)

Prof. Dr. Luiz Fernando Spinelli Pinto (Examinador)
(DS / FAEM / UFPEL)

Prof. Dr. Gilberto Loguercio Collares (Examinador)
(Eng. Hídrica / UFPEL)

Prof. Dr. Vitor Emanuel Quevedo Tavares (Examinador)
(DER / FAEM / UFPEL)

Pelotas, 2009.

A DEUS,

por me permitir sentir a sua presença em todos os momentos de minha caminhada:

nos momentos felizes que vivi, ao dividir com outros, me aproximei um pouco mais DELE,

e, nos tristes e solitários momentos de desânimo e dificuldades, em que aproximou-SE mais de mim,

AGRADEÇO.

Aos meus pais,

LUIZ NEBEL, a quem sou eternamente grato por seus conselhos e ilimitado apoio, e por me transmitir uma infindável perseverança e coragem de lutar,

OLINA, exemplo de mãe, por seu amor e sua constante e incansável dedicação em todos os momentos de minha vida e de meus irmãos,

À minha esposa

MARITA, por fazer nossos os meus sonhos, e por sua particular capacidade de, a seu jeito e intensidade, partilhar nossa existência,

Aos nossos filhos

RAQUEL, CAMILA e RAFAEL, por representarem a plenitude e única razão de cada passo que dou em minha vida,

DEDICO.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e a EMBRAPA / CPACT pelo aporte de recursos para a execução deste trabalho;

Aos colegas do Pós e aos funcionários do Departamento de Solos da FAEM, indistintamente, pela fraternal convivência, amizade e apoio em todos os momentos;

Aos professores do Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Eloy, Spinelli, Flávia, Danilo e Tânia, pelos ensinamentos, amizade e apoio;

Ao Prof. Luís Carlos Timm, pela orientação, oportunidade e conhecimentos transmitidos;

Aos professores Rogério Oliveira de Souza e Rosa Maria Vargas Castilhos, que além dos ensinamentos e incentivo, nutriram reconhecida amizade e respeito;

Ao Prof. Ledemar Carlos Vahl pelos ensinamentos, incentivo, e, acima de tudo, pelo permanente apoio, respeito, e amizade que pude compartilhar durante todos os momentos de minha passagem pelo pós-graduação no Departamento de Solos;

A todos os amigos, próximos ou distantes, que de um jeito ou outro contribuíram para a conclusão deste trabalho;

A TODOS, MUITO OBRIGADO.

RESUMO

NEBEL, Alvaro Luiz Carvalho. **Funções de pedotransferência e estrutura de variabilidade espacial da retenção de água em solos de várzea do Rio Grande do Sul**. 2009. 140f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós- Graduação em Agronomia. Universidade Federal de Pelotas, Pelotas.

Estudos que envolvem a dinâmica da água no sistema solo-planta-atmosfera tais como disponibilidade de água no solo para as culturas, infiltração, drenagem e movimento de solutos no solo necessitam do conhecimento da relação entre o conteúdo de água no solo e o potencial matricial, representada pela curva de retenção de água no solo. No entanto, sua execução é laboriosa, demanda considerável tempo e custos. Uma alternativa é sua estimativa através de equações estatísticas denominadas Funções de Pedotransferência (FPTs). O objetivo deste estudo foi avaliar o desempenho de funções de pedotransferência em estimar a retenção de água no solo e capturar a sua estrutura de variabilidade espacial, usando ferramentas geoestatísticas, quando aplicadas em um solo de várzea da região sul do Brasil. Para isto, uma malha experimental de 10m x 10m foi estabelecido e amostras deformadas e indeformadas do solo foram coletadas representativas da camada de 0 – 0,20m, totalizando 100 pontos amostrais. Os seguintes atributos do solo foram determinados em cada ponto: textura, carbono orgânico, pH, capacidade de troca de cátions, densidade do solo e a curva de retenção de água no solo. Oito FPTs desenvolvidas para estimar o conteúdo gravimétrico de água no solo, oito para estimar o conteúdo volumétrico e cinco para estimar os parâmetros do modelo de van Genuchten foram avaliadas, usando as medidas estatísticas erro médio (ME) e raiz quadrada do erro médio ao quadrado (RMSE). Os resultados obtidos para a estimativa do conteúdo de água gravimétrico mostram que a FPT de Oliveira et al. (2002) apresentou o melhor desempenho para a tensão de 33kPa, com erro médio (ME) de $0,0136\text{g.g}^{-1}$, enquanto para a tensão de 1500kPa a FPT de Pidgeon (1972) foi melhor, com ME de $-0,0054\text{g.g}^{-1}$. Com relação ao potencial de descrever a estrutura de variabilidade espacial do conjunto de dados medidos, as FPTs desenvolvidas por Bell & van Keulen (1995 e 1996) e Urach (2007) foram as que apresentaram melhor desempenho baseado nos resultados da validação cruzada. Para o conteúdo volumétrico de água retida no solo, os melhores desempenhos foram obtidos pela FPT de Tomasela et al.(2003) para a tensão de 10kPa, Rawls et al. (1982) para 33kPa e van den Berg et al.(1997) para 1500kPa, com ME iguais a $0,019\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$, $0,001\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ e $-0,008\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$, respectivamente. Os parâmetros da estrutura de dependência espacial, alcance e patamar, para a tensão de 33kPa foram razoavelmente estimados, enquanto para a tensão de 1500kPa foram subestimados pelas FPTs avaliadas. A FPT paramétrica desenvolvida por Vereecken et al. (1989) apresentou o menor valor de ME ($0,0247\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$), enquanto a FPT de Hodnett e Tomasella (2002) apresentou o menor valor de RMSE ($0,0367\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$). Ambas FPTs descreveram bem os semivariogramas experimentais do conteúdo de água retido no solo a 10kPa e 33kPa, entretanto para a tensão de 1500kPa nenhuma das FPTs testadas apresentou bom desempenho.

Palavras-chave: Funções de pedotransferência, geoestatística, indicadores de qualidade, solos de várzea, retenção de água, umidade do solo.

ABSTRACT

NEBEL, Alvaro Luiz Carvalho. **Pedotransfer functions and spatial variability of water retention in lowland soils of Rio Grande do Sul state**. 2009. 140f. Thesis (Doctor) – Post Graduate Program in Agronomy. Federal University of Pelotas, Pelotas.

The understanding of the dynamics of the water in the soil-plant-atmosphere system, including the water availability to the crops, soil water infiltration, drainage and soil solute movement, depends on the knowledge of the relation between the soil water content and the matric potential, represented by the soil water retention curve (SWRC). However, the establishment of SWRCs is laborious and time consuming, besides being costly. A alternative is its estimate through statistical equations called Pedotransfer Functions (PTFs). The aim of this study was to evaluate the ability of some existing PTFs, in predicting the soil water retention and to capture its spatial variability structure, using geostatistical tools, when applied in a lowland soil of the south region of Brazil. For this, an experimental 10 x 10 m grid was established and soil disturbed and undisturbed samples were collected in the 0-0.20 m soil depth, totaling 100 experimental points. The following soil attributes were determined in each point: soil texture, soil organic carbon, pH, cation exchange capacity, soil bulk density, and the soil water retention curve. Eight developed PTFs for estimating gravimetric soil water content, eight for estimating volumetric water content and five for estimating the van Genuchten model parameters were evaluated using the statistical measures mean error (ME), and the root mean square error (RMSE). Results indicated that the Oliveira et al. (2002) PTF presented the best performance for estimating the gravimetric soil water content at the tension of 33kPa, with mean error (ME) value of 0.0136g.g^{-1} , while for the gravimetric water content at tension of 1500kPa the Pidgeon (1972) FPT was the best, with ME value of -0.0054g.g^{-1} . Concerning to the potential of describing the spatial variability structure the Bell & van Keulen (1995 and 1996) and of Urach (2007) PTFs presented the best performance based on the results from the cross validation technique. For estimating the soil water volumetric content at the tension of 10kPa the Tomasela et al. (2002) was the best (ME of $0.019\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$), while Rawls et al. (1982) and van den Berg et al. (1997) PTFs were the best for estimating soil water content at the tension of 33kPa (ME of $0.001\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$) and 1500kPa (ME of $-0.008\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$), respectively. The range and sill geostatistical parameters for the tension of 33kPa were reasonable estimated, while for the tension of 1500kPa they were underestimated by the evaluated PTFs. The Parametric Pedotransfer Function constructed by Vereecken et al.(1989) presented the lowest value of ME ($0.0247\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$), while the Hodnett and Tomasella (2002) PTF presented the lowest value of RMSE ($0.0367\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$). Both PTFs well described the experimental semivariograms of the soil water content at the tensions of 10kPa and 33kPa, however their performance was not good for the tension of 1500kPa.

Key words: pedotransfer functions, geostatistics, statistical measures, lowland soils, soil water retention curve, spatial variability.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Funções de Pedotransferência pontuais avaliadas neste estudo.....	35
Tabela 2	Desempenho das FPTs na estimativa da U_{g33kPa} e $U_{g1500kPa}$ avaliadas pelos indicadores estatísticos erro médio (ME), raiz quadrada do erro médio ao quadrado (RMSE), coeficiente de determinação (r^2).....	38
Tabela 3	Análise exploratória do conjunto de dados medidos de U_{g33kPa} e $U_{g1500kPa}$ e os estimados pelas FPTs, para os 100 pontos experimentais.....	42
Tabela 4	Variância dos dados medidos de U_{g33kPa} e $U_{g1500kPa}$ e estimados pelas FPTs, parâmetros geoestatísticos e os resultados da validação cruzada.....	44
Tabela 5	Funções de Pedotransferência pontuais para a umidade volumétrica do solo nas tensões de 10kPa (θ_{10kPa}), 33kPa (θ_{33kPa}) e 1500kPa ($\theta_{1500kPa}$) e regiões geográficas originárias dos solos utilizados.....	58
Tabela 6	Equações dos parâmetros das FPTs de Tomasella et al. (2003).....	59
Tabela 7	Faixa de magnitude (mínimos e máximos) dos atributos do solo utilizados na calibração das FPTs.....	59
Tabela 8	Estatística descritiva dos valores de θ_{10kPa} , θ_{33kPa} e $\theta_{1500kPa}$ ($cm^3.cm^{-3}$) medidos e estimados pelas FPTs.....	62
Tabela 9	Indicadores estatísticos erro médio (ME), raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE), coeficiente de determinação (r^2) e classificação (clas.) das FPTs avaliadas nas tensões de 10, 33 e 1500kPa.....	63
Tabela 10	Parâmetros geoestatísticos e resultados da validação cruzada para os dados medidos de θ_{10} , θ_{33} e θ_{1500} kPa e estimados pelas FPTs.....	73
Tabela 11	Variáveis explanatórias utilizadas para estimativa dos parâmetros da equação de van Genuchten (1980) em cada uma das FPTs avaliadas.....	92
Tabela 12	Faixa de magnitude (mínimos e máximos) dos atributos do solo utilizados na calibração das FPTs.....	92
Tabela 13	Análise exploratória do conjunto de dados ajustados de θ_{10kPa} a $\theta_{1500kPa}$ e estimados pelas FPTs, e valores dos indicadores estatísticos de avaliação de desempenho (ME, RMSE e r^2).....	96
Tabela 14	Indicadores estatísticos ME ($cm^3.cm^{-3}$) e RMSE ($cm^3.cm^{-3}$) para o conjunto de dados ajustado e estimados pelas FPTs, integrado para todas as tensões avaliadas.....	98
Tabela 15	Parâmetros geoestatísticos e resultados da validação cruzada para os dados ajustados de θ_{10} , θ_{33} e θ_{1500} kPa e estimados pelas FPTs, ambos ajustados ao modelo experimental esférico.....	106

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Localização da região e ilustração da malha experimental de 100 pontos.....	26
Figura 2	Vista geral da área experimental quando do início da coleta das amostras espacialmente referenciadas (04.10.2006).....	27
Figura 3	Detalhe do solo (a) e da profundidade (0,075m) inicial de inserção (b) dos anéis para coleta das amostras indeformadas	28
Figura 4	Detalhe do posicionamento de coleta das amostras deformadas e indeformadas em relação ao ponto referenciado.....	29
Figura 5	Localização da região e ilustração da malha experimental de 100 pontos.....	34
Figura 6	Gráficos 1:1 dos valores medidos de Ug33kPa e estimados pela FPT de Oliveira et al.(a) e dos valores medidos de Ug1500kPa e estimados pela FPT de Pidgeon (b).	40
Figura 7	Semivariogramas isotrópicos experimentais e teóricos para os dados medidos de Ug33kPa e estimados pelas FPTs avaliadas....	46
Figura 8	Semivariogramas isotrópicos experimentais e teóricos para os dados medidos de Ug1500kPa e estimados pelas FPTs avaliadas.	48
Figura 9	Ilustração da malha experimental com os 100 pontos.....	55
Figura 10	Gráficos de dispersão com linha 1:1 dos valores medidos de θ_{10kPa} e estimados por (a) Rawls et al., 1982; (b) Van den Berg et al.,1997; (c) Tomasella et al., 2003; (d) Urach, 2007 / Irriga; (e) Urach, 2007 / Literatura.....	69
Figura 11	Gráficos de dispersão com linha 1:1 dos valores medidos de θ_{33kPa} e estimados por (a) Rawls et al., 1982; (b) Aina & Periaswamy, 1985; (c) Gaiser et al., 2000; (d) Giarola et al.,2002; (e) Urach, 2007 / Irriga e (f) Urach, 2007 / Literatura	70
Figura 12	Gráficos de dispersão com linha 1:1 dos valores medidos de $\theta_{1500kPa}$ e estimados por (a) Rawls et al, 1982; (b) Aina & Periaswamy, 1985; (c) Van den Berg et al., 1997; (d) Gaiser et al. 2000; (e) Giarola et al.,2002; (f) Tomasella et al., 2003; (g) Urach, 2007 – Irriga e (h) Urach, 2007 – Literatura.....	71
Figura 13	Semivariogramas experimental e teórico para os valores de θ_{10kPa} (a) medido e estimado pelas FPTs de (b) Rawls et al., (c) van den Berg et al., (d) Tomasella et al., (e) Urach – Irriga e (f) Urach – Literatura.....	76
Figura 14	Semivariogramas experimental e teórico para os valores de θ_{33kPa} (a) medido e estimado pelas FPTs de (b) Rawls et al., (c) Aina & Periaswamy, (d) Gaiser et al, , (e) Giarola et al., (f) Urach – Irriga e (g) Urach – Literatura.....	77

Figura 15	Semivariogramas experimental e teórico para os valores de $\theta_{1500\text{kPa}}$ medido (a) e estimado pelas FPTs de Rawls et al. (b), Aina & Periaswamy (c), van den Berg et al. (d) Gaiser et al., (e) Giarola et al. (f) Tomasella et al. (g), Urach – Irriga (h) e Urach – Literatura (i).....	78
Figura 16	Mapas de contorno construídos a partir dos conjuntos de dados medidos de umidade volumétrica (θ) e estimados pelas FPTs nas tensões de 10 kPa, 33 kPa e 1500 kPa.....	79
Figura 17	Dispersão dos valores estimados pelas FPTs e ajustados de $\theta_{10\text{kPa}}$ em torno da linha 1:1.....	100
Figura 18	Dispersão dos valores estimados pelas FPTs e ajustados de $\theta_{33\text{kPa}}$ em torno da linha 1:1.....	101
Figura 19	Dispersão dos valores estimados pelas FPTs e ajustados de $\theta_{1500\text{kPa}}$ em torno da linha 1:1.....	102
Figura 20	Gráficos de dispersão entre os valores ajustados e os estimados pela FPT de Vereecken et al. 1989.....	103
Figura 21	Gráficos de dispersão entre os valores ajustados e os estimados pela FPT de Hodnett & Tomasella (2002).....	104
Figura 22	Semivariogramas teóricos e experimentais (modelo esférico) para os valores ajustados de $\theta_{10\text{kPa}}$, $\theta_{33\text{kPa}}$ e $\theta_{1500\text{kPa}}$ e estimados pelas FPTs analisadas	109
Figura 23	Mapas de contorno para os dados de $\theta_{10\text{kPa}}$ ajustados (a) e estimados pelas FPTs de Vereecken et al. (1989) (b) e Hodnett e Tomasella (2002) (c) e os dados de $\theta_{33\text{kPa}}$ ajustados (d) e estimados pelas FPTs de Vereecken et al. (1989) (e) e Hodnett e Tomasella (2002) (f).....	112

LISTA DE SIMBOLOS E ABREVIATURAS

Símbolo	Descrição	Unidade
FPT	Função de Pedotransferência	
θ	Umidade volumétrica do solo	$\text{m}^3.\text{m}^{-3}$
Ug	Umidade gravimétrica do solo	$\text{Kg}.\text{kg}^{-1}$
CC	Capacidade de campo	
PMP	Ponto de Murcha Permanente	
$\theta_{10\text{kPa}}$	Umidade volumétrica do solo na tensão de 10kPa	$\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$
$U_{g10\text{kPa}}$	Umidade gravimétrica do solo na tensão de 10kPa	$\text{g}.\text{g}^{-1}$
θ_s	Umidade de saturação	$\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$
θ_r	Umidade residual, sob tensão	$\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$
ψ	Potencial matricial do solo	kPa
ME	Erro médio	$\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ ou $\text{g}.\text{g}^{-1}$
Me	Umidade equivalente	$\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$
RMSE	Raiz quadrada do erro quadrático médio	$\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$
r^2	Coeficiente de determinação	%
γ	semivariância	
DMP	Diâmetro Médio Ponderado	mm
DMG	Diâmetro Médio Geométrico	mm
CTC	Capacidade de Troca de Cátions	$\text{cmol}_c.\text{kg}^{-1}$
C0	Efeito Pepita	
C+C0	Patamar	
A	Alcance	m
SQR	Soma dos Quadrados dos Resíduos	
Mo	Teor de matéria orgânica no solo	% ou $\text{g}.\text{kg}^{-1}$
Co	Teor de carbono orgânico no solo	% ou $\text{g}.\text{kg}^{-1}$
Ds	Densidade do solo	$\text{Mg}.\text{m}^{-3}$
Arg	Teor de argila no solo	%

ei	Valor estimado da variável resposta	
em	Valor medido da variável resposta	
K-S	Valor da estatística do teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov	
CV	Coeficiente de variação	%
Mdna.	Mediana (momento estatístico)	
Assim.	Coeficiente de assimetria	
Curt.	Coeficiente de curtose	
GDE	Grau de Dependência Espacial	%
CR	Coeficiente de Regressão da Validação Cruzada	
CRA	Curva de Retenção de Água no solo	
GMDH	Group Method of Data Handling	
DP	Desvio Padrão	
Min.	Valor Mínimo	
Max.	Valor Máximo	
m	Parâmetro de ajuste da equação de van Genuchten	
n	Parâmetro de ajuste da equação de van Genuchten	
Ln α	Logarítmo neperiano do parâmetro α da equação de van Genuchten	
Dp	Densidade de partícula do solo	Mg.m ⁻³
Pt	Porosidade Total do solo	m ³ .m ⁻³
Macrop	Macroporosidade do solo	m ³ .m ⁻³
Microp	Microporosidade do solo	m ³ .m ⁻³
Ar Gr	Areia Grossa	
Ar Fin	Areia Fina	

LISTA DE APÊNDICES

Apêndice A	Descrição morfológica dos perfis.....	115
Apêndice B	Estatística descritiva dos conteúdos de água volumétricos(θ) e gravimétricos (U_g) retidos no solo, nas tensões de 1, 6, 10, 33, 100 e 1500kPa.....	121
Apêndice C	Estatística descritiva dos atributos físicos e químicos avaliados	122
Apêndice D	Coeficientes de correlação entre as variáveis físicas e químicas avaliadas e os conteúdos volumétrico (θ) e gravimétrico (U_g) de água nas tensões analisadas.....	123
Apêndice E	Coeficientes de correlação de Pearson entre as variáveis físicas e químicas analisadas.....	124
Apêndice F	Teste de ajuste dos semivariogramas para diferentes lags.....	125
Apêndice G	FPTs Paramétricas avaliadas.....	139

SUMÁRIO

RESUMO.....	6
ABSTRACT.....	7
LISTA DE TABELAS.....	8
LISTA DE FIGURAS.....	9
LISTA DE SIMBOLOS E ABREVIATURAS.....	11
LISTA DE APÊNDICES.....	13
SUMÁRIO.....	14
1 INTRODUÇÃO.....	16
2 HIPÓTESES.....	23
3 OBJETIVO GERAL.....	24
4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	25
5 METODOLOGIA	26
5.1- Localização e descrição da área experimental	26
5.2- Coletas das amostras de solo.....	28
5.3- Análises em laboratório.....	29
5.4- Análises dos dados.....	30
6 CAPÍTULO 1. FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA PONTUAIS GRAVIMÉTRICAS E VARIABILIDADE ESPACIAL DA RETENÇÃO DE ÁGUA EM SOLOS DE VÁRZEA.....	32
6.1- Introdução.....	32
6.2- Material e métodos.....	33
6.3- Resultados e discussão.....	38
6.3.1- Análise da variabilidade espacial.....	43
6.4- Conclusões.....	47
6.5- Referências.....	48
7 CAPÍTULO 2. FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA PONTUAIS VOLUMÉTRICAS E VARIABILIDADE ESPACIAL DA RETENÇÃO DE ÁGUA EM SOLOS DE VÁRZEA.....	52
7.1- Introdução.....	52

7.2- Material e métodos.....	54
7.3- Resultados e discussão.....	60
7.3.1- Análise da variabilidade espacial.....	72
7.4- Conclusões.....	80
7.5- Referências.....	80
8 CAPÍTULO 3. FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA PARAMÉTRICAS E VARIABILIDADE ESPACIAL DA CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA EM SOLOS DE VÁRZEA DO RS.....	85
8.1- Introdução.....	85
8.2- Material e métodos.....	88
8.3- Resultados e discussão.....	94
8.3.1- Análise das funções de pedotransferência.....	94
8.3.2- Análise da variabilidade espacial.....	105
8.4- Conclusões.....	113
8.5- Referências.....	113
9 CONCLUSÕES FINAIS.....	118
10 REFERÊNCIAS.....	120
APÊNDICES	126

1 INTRODUÇÃO

A retenção de água no solo e a condutividade hidráulica são importantes propriedades hídricas relacionadas ao fluxo de água no solo, transporte de solutos e poluentes, trafegabilidade, programação da irrigação, desenvolvimento e produção das culturas, potencial de emissão de gases pelos solos, e a erosão, entre outros (WÖSTEN et al., 1985; BOUWMAN et al., 1994; UNGARO e CALZOLARI, 2001; RAJKAI et al., 2004).

Milly e Dunne (1994) demonstraram o relacionamento do ciclo global da água com a capacidade de retenção de água na terra, o que a princípio pode parecer óbvio, entretanto, destaca a interação entre a umidade do solo e o ambiente atmosférico. Entekhabi et al. (1995) mostraram que a variabilidade do tempo e do clima é influenciada pelo estado da umidade do solo, o qual é um dos principais componentes dos Modelos de Circulação Geral, que descrevem as interações da superfície-atmosfera da terra.

Nas atividades agrícolas, o estado da água no solo determina a germinação de sementes, desenvolvimento de plantas, movimentação de nutrientes até a zona radicular, conteúdo de ar no solo e as trocas gasosas, afetando assim a atividade biológica, produtividade das culturas e os processos de infiltração e escoamento superficial. No entanto, as medidas da condutividade hidráulica do solo e dos parâmetros de retenção de água no solo demandam tempo considerável e são onerosos, especialmente em estudos de escala regional, necessitando ainda de equipamentos e mão de obra especializada (BOUMA, 1989; VEREECKEN, 1995; PACHEPSKY e RAWLS, 2004).

Para a estimativa destes parâmetros em extensas áreas ou em Modelos de Circulação Geral, freqüentemente há a necessidade de recorrer ao uso de

estimativas relacionando estes atributos hídricos com variáveis atmosféricas e outros dados de solos, eventualmente disponíveis em levantamentos pedológicos ou em banco de dados (McBRATNEY et al., 2002; PACHEPSKY e RAWLS, 2004).

Nemes e Rawls (2004) citam que Briggs & McLane, em 1907, foram provavelmente os primeiros a fazer previsões da umidade a partir da textura dos solos, seguidos mais tarde, por Briggs & Shantz, que em 1912 estimaram o ponto de murcha permanente em função da composição textural do solo. Vários pesquisadores quantificaram e interpretaram relações entre propriedades do solo, usando indistintamente os termos previsão, estimativa ou correlação de propriedades do solo para nomear índices, procedimentos e resultados de tais estudos (PACHEPSKY e RAWLS, 2004).

Bouma e Lanen (1987) denominaram as equações de regressão estatística que expressam relações entre propriedades do solo, de “funções de transferência” e mais tarde “funções de pedotransferência” (BOUMA, 1989). Assim, as funções de pedotransferência (FPTs) foram definidas como a estimativa de certas propriedades do solo a partir de propriedades mais facilmente, baratas ou rotineiramente medidas (BOUMA, 1989; van den BERG et al., 1997).

Wösten et al. (2001) distinguem três diferentes tipos de FPTs para estimar propriedades hidráulicas: i) Tipo 1 - Previsão de propriedades hidráulicas baseada no modelo da estrutura do solo: são exemplos deste tipo de FPT os modelos apresentados por Bloemen (1980) e Arya & Paris (1981) onde a curva de retenção de água foi estimada a partir da sua relação com a forma e o tamanho dos poros do solo; ii) Tipo 2 – Previsão de um ponto da curva de retenção de água do solo (denominada de FPT pontual): neste tipo de FPT são estimados pontos específicos de interesse da curva de retenção de água do solo; iii) Tipo 3 – Previsão de parâmetros usados para descrever as propriedades hidráulicas do solo (denominada de FPT paramétrica): neste tipo as FPTs são relações funcionais que transformam propriedades do solo disponíveis (ex: textura, estrutura, matéria orgânica do solo, etc.) em propriedades do solo não disponíveis (ex: curva de retenção de água no solo). Em contraste ao tipo 2, FPTs do tipo 3 usualmente estimam parâmetros dos modelos que descrevem a relação completa entre umidade do solo-potencial matricial-condutividade hidráulica do solo, sendo este tipo mais simples e direto do que o tipo 2 devido o fato de que os resultados são diretamente aplicáveis em simulação de modelos, citando-se como exemplo, FPTs para estimar os parâmetros

dos modelos de Brooks & Corey, em 1964, e de van Genuchten (1980) para estimar a curva de retenção de água no solo.

McBratney et al. (2002) relatam que provavelmente devido à maior dificuldade e do custo elevado de medição, é mais freqüente o desenvolvimento de FPTs para a estimativa da retenção de água pelo solo. Para exemplificar, citam-se alguns trabalhos, como as FPTs desenvolvidas para solos dos EUA (RAWLS et al., 1982, 1985; SAXTON e RAWLS, 2006), Canadá (DE JONG et al., 1983), Austrália (MINASNY e MACBRATNEY, 2000), Bélgica (VEREecken et al., 1989), Holanda (WÖSTEN et al., 1995), Suíça (RAJKAI et al., 1996), Alemanha (SCHEINOST et al., 1997), URSS (MAYR & JARVIS, 1999), Itália (UNGARO et al., 2005) e no Brasil (ARRUDA et al., 1987; Van den BERG et al. 1997; TOMASELLA e HOODNETT, 1998; TOMASELLA et al., 2000, 2003; OLIVEIRA et al., 2002; HOODNETT e TOMASELLA, 2002; SILVA et al., 2008). Estas funções de pedotransferência desenvolvidas no Brasil incorporaram grande variação de solos com ampla diversidade pedogenética e mineralógica, exceto o trabalho de Silva et al. (2008) que desenvolveu FPTs para Latossolos do estado de São Paulo, e a de van den Berg et al., (1997) que avaliou solos de vários países de regiões tropical, todos predominantemente Latossolos.

Para os solos do Rio Grande do Sul (RS), Giarola et al. (2002), Solano (2003) e Urach (2007) desenvolveram FPTs a partir de conjuntos de dados com representação de diversos tipos de solos de regiões do RS, mas que predominantemente são oriundos de áreas altas, com pequena representação de solos de várzea em suas FPTs. Isto desperta o questionamento a respeito do desempenho das FPTs quando aplicadas a solos de uma região geograficamente próxima da região para onde a FPT foi desenvolvida, com faixa de amplitude das variáveis explanatórias dentro da faixa de validação da FPT, mas com características do material de origem e ambiente de formação do solo diferente ou com pouca representação no conjunto de solos que deu origem a FPT.

Relacionado aos questionamentos referidos anteriormente, van den Berg et al. (1997) discutem que as diferenças físicas e químicas entre os solos de regiões temperada e tropical podem ser as causas do fraco desempenho das FPTs “de solos temperados” quando aplicadas aos solos de regiões tropicais, normalmente mais intemperizados. Hodnett e Tomasella (1998) observaram que, no caso dos oxissolos, o conteúdo de argila excede freqüentemente 60%, quando FPTs desenvolvidas para

solos temperados não cobrem essa magnitude. Oliveira et al. (2002) alertam que o uso de FPTs só deve ser implementado após calibrações locais. Os autores afirmam que as FPTs tendem a ter melhor desempenho em sua aplicação quanto mais homogêneo forem os solos usados para calibração e os solos que terão os dados estimados.

Tomasella et al. (2000) comentam sobre as diferenças no teor de silte entre os solos usados na FPT de Tietje e Tapkenhinrichs (1993) e os solos brasileiros. Os autores citam que no banco de dados utilizados para desenvolvimento da FPT (Tomasella et al. 2000) o teor de silte no solo variou entre 15 e 20% e raramente foi superior a 50%, afirmando que geralmente nos solos brasileiros o teor de silte é baixo em relação aos solos de regiões temperadas. Esta diferença foi atribuída pelos autores como a causa do baixo desempenho das FPTs de Saxton et al.(1986) e Vereecken et al.(1989) testadas no banco de dados de solos brasileiros. Tomasella e Hodnett (1998) afirmam que em regiões tropicais úmidas somente solos hidromórficos podem apresentar teor de silte maior do que 40%.

Com relação ao desenvolvimento de novas FPTs, Minasny et al., (2003) esclarecem que é uma tarefa árdua, porque requer uma ampla base de dados de solos contendo muitos dados morfológicos e determinações de laboratório. Aconselham que, em primeira instância, se faça uso de FPTs já desenvolvidas, mas ponderam que a validade de uma determinada FPT não deve ser interpolada ou extrapolada além do ambiente pedológico ou tipo de solo em que foi desenvolvida, e que, a aplicação direta de uma FPT em solos com propriedades distintas só deve ser feita após testar seu desempenho, de forma que FPTs mais adequadas possam ser identificadas.

Outro aspecto que recentemente tem sido discutido a respeito das FPTs é quanto a sua capacidade em descrever a estrutura de dependência espacial da variável estimada.

A variabilidade espacial do solo está associada a diferentes fatores, tais como: processos que envolvem a ação dos fatores de formação do solo, variações climáticas, práticas de manejo, características do material de origem entre outros.

Para Nielsen & Wendroth (2003) a descrição do padrão espacial de um atributo do solo possibilita a caracterização de subáreas que poderão ser tratadas de uma forma individualizada. Essa descrição é possível desde que se considere a posição no espaço dos valores amostrais e a estrutura de dependência espacial do

atributo. Quando um determinado atributo varia de um local para outro, com algum grau de organização ou continuidade, expresso através da dependência espacial, a estatística clássica e a Geoestatística podem ser usadas conjuntamente no estudo da variabilidade espacial do atributo (Vieira, 2000; Reichardt & Timm, 2004).

Goovaerts (1988) observa que a caracterização da estrutura de variabilidade espacial dos atributos do solo permite o melhor entendimento das complexas relações entre estes atributos e os fatores ambientais. Roque et al., (2005) comentam que se a variabilidade espacial não for considerada, o planejamento de uso e o manejo do solo, bem como a eficiência de projetos de irrigação e drenagem ou conservação do solo podem ser comprometidos.

Para Herbst et al., (2006) todo o esforço para modelar a distribuição de dados hidrológicos do solo requer a entrada da distribuição espacial das propriedades físico-hídricas do solo.

A base da geoestatística vem da Teoria das Variáveis Regionalizadas de Matheron, que diz que a diferença nos valores de um dado atributo tomados em dois pontos do campo depende da distância entre eles (Journel & Huijbregts, 1978). Assim, a diferença entre os valores do atributo tomados em dois pontos mais próximos no espaço deve ser menor do que a diferença entre os valores tomados em dois pontos mais distantes. Portanto, cada valor carrega consigo uma forte interferência dos valores de sua vizinhança, caracterizando a continuidade espacial (Isaaks & Srivastava, 1989).

Russo e Bresler (1981) salientam que as propriedades hidráulicas do solo geralmente não variam aleatoriamente no espaço, mas apresentam arranjo estrutural com uma dimensão característica, correspondente ao domínio desta propriedade, ou seja, a distância dentro da qual há interdependência dos valores medidos. Babalola (1978) comenta que a alta variabilidade das propriedades físicas do solo, tais como o conteúdo de areia, argila e silte, bem como da densidade do solo, resultam em alta variabilidade nas características de retenção de água pelo solo.

Para avaliar o potencial de quatro FPTs em descrever a estrutura de variabilidade espacial da retenção de água no solo em uma transeção espacial Romando & Santini (1997) aplicaram ferramentas geoestatísticas. Os autores concluíram que a análise geoestatística mostrou que existem fortes similaridades nas estruturas de variabilidade espacial detectadas pelas FPTs avaliadas.

Entretanto, os semivariogramas construídos a partir dos dados estimados pelas FPTs diferiram daqueles construídos a partir dos dados medidos.

Avaliando dois procedimentos para regionalização das curvas de retenção de água (CRA) no solo, Sinowski et al. (1997) utilizaram uma FPT desenvolvida para estimar os parâmetros de van Genuchten (1980), integrando a estrutura de dependência espacial na análise. Em uma área com elevada variabilidade no material de origem e uso do solo, os autores estabeleceram uma malha de 50m x 50m com 450 pontos regularmente distribuídos. Os procedimentos testados foram (1) primeiramente interpolando as variáveis explanatórias e aplicando então a FPT aos dados interpolados para predizer as CRAs, e (2) estimando primeiramente as CRAs, com a aplicação da FPT nas medidas pontuais das variáveis explanatórias, e interpolando então as CRAs. As variáveis explanatórias foram medidas nos 450 pontos da malha e as curvas em dezessete locais irregularmente distribuídos. Os autores observaram uma diminuição no RMSD (raiz quadrada dos desvios médios) entre os conteúdos de água estimados e medidos de 16% para o procedimento (1), e concluem que os erros associados com a regressão são aproximadamente da mesma ordem que os encontrados para a krigagem. Sugerem ainda, que o método de aplicar as FPTs antes da estimativa da distribuição espacial deva ser usado para todas as FPTs baseadas em frações da distribuição granulométrica, a fim de evitar inconsistências na composição textural estimada.

Herbst et al. (2006) concluíram que o uso de características do relevo melhoram a estimativa espacial de propriedades hidráulicas do solo, e que o uso de regressões múltiplas revela um potencial elevado para a predição espacial de propriedades hidráulicas do solo.

Romano (2004) referindo-se a possibilidade das FPTs em capturar a estrutura de dependência espacial da variável estimada, conclui suas observações com a seguinte frase: “Nós temos ainda uma grande distância a percorrer.”

Neste contexto, o trabalho desenvolvido teve como objetivos avaliar a aplicabilidade e a transferabilidade de Funções de Pedotransferência desenvolvidas para estimar a retenção de água no solo, e a capacidade destas FPTs em descrever a estrutura de dependência espacial das variáveis estimadas, por meio de ferramentas geoestatísticas, a partir de um conjunto de dados regionalizados coletados em um solo hidromórfico no município de Capão do Leão – RS.

Foram conduzidos três estudos avaliando FPTs pontuais e paramétricas. No primeiro estudo avaliou-se oito FPTs pontuais desenvolvidas em distintas regiões, para estimar o conteúdo gravimétrico de água no solo nas tensões de 33kPa e 1500kPa. O segundo estudo contemplou oito FPTs pontuais desenvolvidas para estimar o conteúdo volumétrico de água no solo nas tensões de 10kPa, 33kPa e 1500kPa, e finalmente, no terceiro estudo, foram avaliadas cinco FPTs paramétricas desenvolvidas para estimar os parâmetros da equação de van Genuchten (1980), utilizada na determinação dos pontos da curva de retenção de água no solo.

2 HIPÓTESES

Funções de Pedotransferência publicadas, desenvolvidas para estimar o conteúdo de água retida no solo sob determinadas tensões, quando aplicadas aos solos de várzea da região sul do Rio Grande do Sul, podem apresentar eficiente desempenho de estimativa.

Funções de Pedotransferência com eficiente desempenho de estimativa do conteúdo de água retida no solo, sob determinadas tensões, conseguem expressar a estrutura de dependência espacial da variável estimada, quando aplicadas a dados espacialmente referenciados.

3 OBJETIVO GERAL

Avaliar o desempenho de algumas Funções de Pedotransferência publicadas, em estimar a retenção de água em um planossolo da região sul do Rio Grande do Sul e sua capacidade em descrever a estrutura de dependência espacial das variáveis hídricas estimadas, a partir de uma malha de 10m x 10m com cem pontos amostrais.

4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- i. Testar o desempenho de funções de pedotransferência pontuais desenvolvidas para estimar o conteúdo gravimétrico de água retido no solo em determinadas tensões de interesse e comparar os parâmetros geoestatísticos dos dados estimados com os obtidos para os dados medidos;
- ii. Testar o desempenho de funções de pedotransferência pontuais desenvolvidas para estimar o conteúdo volumétrico de água retido no solo em determinadas tensões de interesse e comparar os parâmetros geoestatísticos dos dados estimados com os obtidos para os dados medidos;
- iii. Testar funções de pedotransferência paramétricas desenvolvidas para estimar os parâmetros da equação de van Genuchten, que descreve a curva de retenção de água no solo, e, a partir de pontos da curva estimados, avaliar o desempenho da estimativa e comparar os parâmetros geoestatísticos dos dados estimados com os obtidos para os dados medidos.

5 METODOLOGIA

5.1 Localização e descrição da área experimental

Em uma área pertencente à Estação Experimental de Terras Baixas, Embrapa Clima Temperado, situada no município do Capão do Leão, ao sul do Rio Grande do Sul, nas coordenadas $52^{\circ}28'00''\text{W}$ e $31^{\circ}49'21''\text{S}$, foi demarcada uma subárea de 0,81 ha e estabelecida uma malha experimental constituída de 100 pontos regularmente espaçados de 10m x 10m (Figura 1).

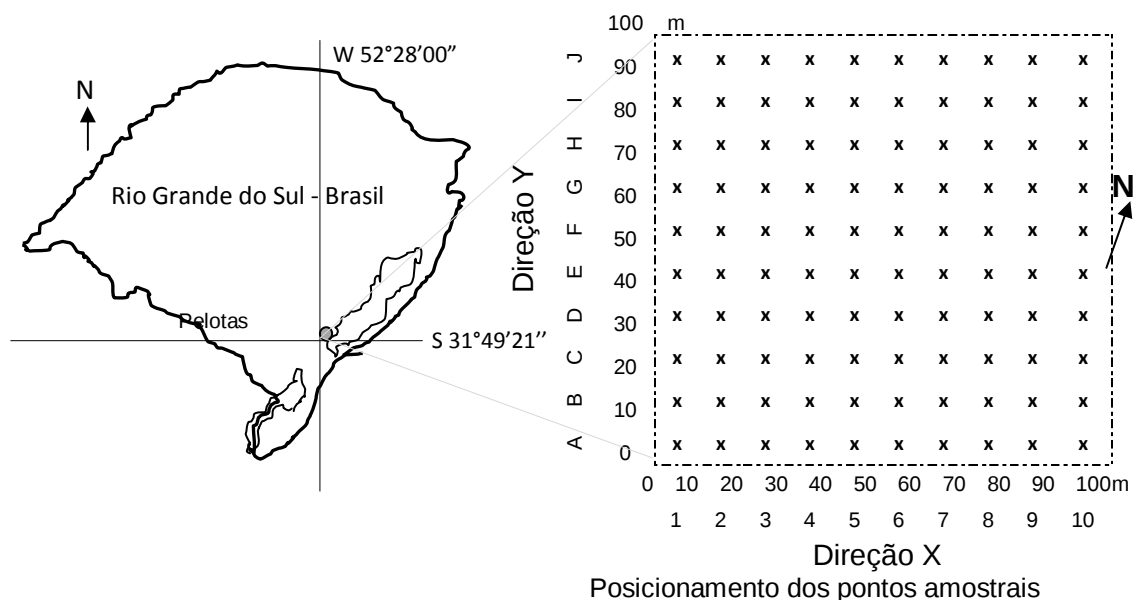


Figura 1 - Localização da região e ilustração da malha experimental de 100 pontos.

Os solos encontrados na área foram classificados em duas classes taxonômicas, as quais ocupam distintas posições na área em função do microrelevo, sendo nas partes relativamente altas Planossolo Háplico Eutrófico gleissólico e nas partes relativamente baixas Gleissolo Háplico Ta Eutrófico solódico, segundo

EMBRAPA (2006) (a descrição completa e a caracterização física e química dos dois perfis são apresentadas no Apêndice A).

Apresentam relevo plano, são imperfeitamente a mal drenados, desenvolvidos a partir de sedimentos recentes originados de rochas graníticas, e compõem, juntamente com outros grupos de solos, os denominados solos de várzea do Rio Grande do Sul. A presença conjunta, em uma área relativamente pequena, de solos de classes taxonômicas diferentes é comum nos solos de várzea, que, sob esta condição de relevo, são formados a partir de diferentes graus de hidromorfismo.

A sub-área experimental (Figura 2) foi utilizada, nas últimas três safras agrícolas, com as culturas do arroz irrigado (2003/2004 e 2004/2005) e sorgo granífero (2005/2006), ambas cultivadas no sistema convencional, com revolvimento do solo, sistema amplamente utilizado na produção de arroz irrigado devido a irregularidade superficial acentuada provocada durante a colheita mecanizada.

O clima na região conforme classificação de Köppen (1936) é o Cfa, sendo o local representativo de um ambiente subtropical, marítimo, de verão subúmido e o resto do ano úmido ou superúmido



Figura 2 – Vista geral da área experimental quando do início da coleta das amostras espacialmente referenciadas (04.10.2006).

5. 2 Coleta das amostras de solo

Em cada ponto da malha foram coletadas duas amostras de solo com estrutura preservada utilizando-se anel volumétrico de 0,05m de diâmetro e 0,03m de altura ($54,48 \times 10^{-6} \text{ m}^3$) na profundidade inicial de 0,075m para determinação da curva de retenção de água nas tensões de 0, 1, 6, 10, 33, 100 e 1500kPa, densidade do solo (D_s), porosidade total (P_t), macroporosidade (Macro) e microporosidade (Micro) do solo (Figuras 3a e 3b).

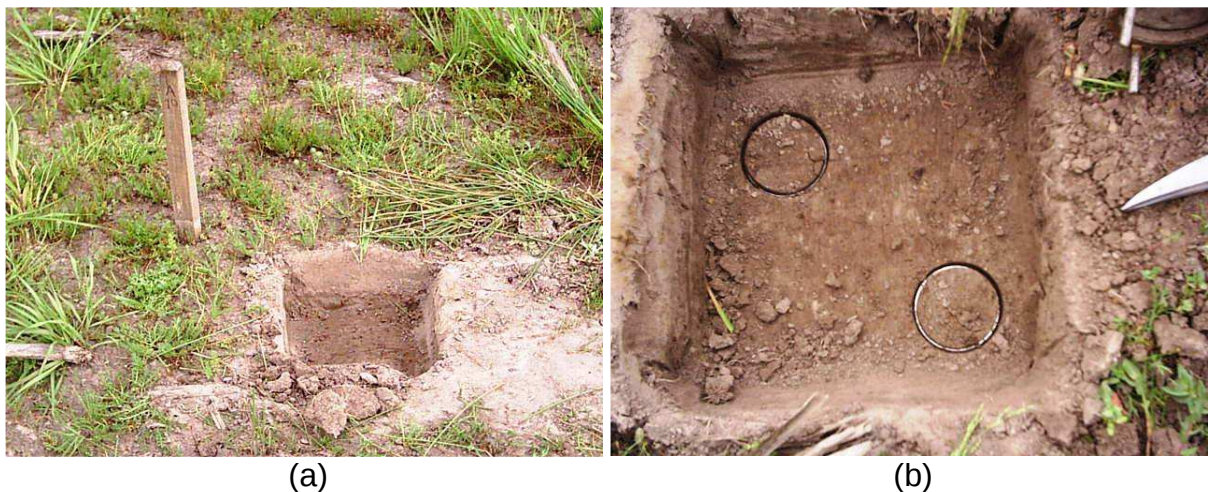


Figura 3 – Detalhe do solo (a) e da profundidade (0,075m) inicial de inserção (b) dos anéis para coleta das amostras indeformadas.

Os pontos da malha foram devidamente medidos e identificados com estacas referenciadas, e, a fim de assegurar que as amostras de solo fossem coletadas a cada 10m, ao redor de cada ponto foram demarcados quatro quadrantes. As amostras com estrutura preservada (indeformadas) foram coletadas no quadrante SE e as deformadas no quadrante SO, a uma distância máxima de 0,30m do ponto demarcado (Figura 4).

As amostras deformadas foram coletadas com pá de corte na camada de 0-0,20m e destinadas para a determinação da densidade de partículas (D_p), granulometria (frações argila, silte, areia total, areia grossa e areia fina), e os atributos químicos do solo. As amostras para determinação da estabilidade dos agregados do solo foram coletadas no mesmo quadrante, retirando-se um cubo de 0,05m x 0,05m até a profundidade de 0,20m, com o cuidado de manter a agregação da amostra no campo.



Figura 4 – Detalhe do posicionamento de coleta das amostras deformadas e indeformadas em relação ao ponto referenciado.

5. 3 Análises em laboratório

As análises foram realizadas nos Laboratórios de Física e de Química do Departamento de Solos da Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas (FAEM-UFPel), com exceção da análise de estabilidade dos agregados do solo que foi realizada no Laboratório de Física do Solo da Embrapa Clima Temperado, Pelotas-RS.

Os pontos da curva foram determinados com base na umidade volumétrica, após preparo e saturação das amostras de solo contidas nos anéis. As amostras saturadas foram pesadas e determinada a umidade volumétrica na tensão 0kPa sendo calculada pela razão entre o volume de água na saturação e o volume do anel. A porosidade total foi considerada igual a umidade volumétrica de saturação (00kPa). Os pontos da curva de retenção de água no solo para as tensões de 1 e 6 kPa foram determinados em mesa de tensão, e os de 10, 33, 100 e 1500 kPa em Câmara de Pressão de Richards, relacionando os conteúdos de água no solo as respectivas tensões de equilíbrio. A estatística descritiva dos conteúdos de água, a base de massa e de volume, são apresentados no Apêndice B.

A densidade do solo (D_s) foi determinada pelo método do anel volumétrico (EMBRAPA, 1997), aproveitando-se a mesma amostra usada para a determinação dos pontos da curva de retenção de água no solo. A determinação do tamanho e estabilidade dos agregados em água foi realizada conforme Palmeira et al. (1999), seguindo os princípios da metodologia descrita por Kemper & Rosenau (1986), que utiliza o aparelho de oscilação de Yoder (1936). Com a determinação e a distribuição dos agregados em classes foi calculado o Diâmetro Médio Ponderado (DMP) e o Diâmetro Médio Geométrico (DMG) dos agregados do solo. Para determinar a distribuição das partículas do solo por tamanho [frações areia (Areia), silte (Silte) e argila (Arg)], foi utilizado o método da pipeta (GEE e BAUDER, 1986), utilizando hidróxido de sódio 1N como agente dispersante. Segundo metodologias descritas em Tedesco et al. (1995), foram determinados os seguintes atributos químicos do solo: pH em água, Alumínio, Potássio, Cálcio, Magnésio e Sódio trocáveis. A acidez potencial ($H + Al$) foi determinada com o uso de acetato de cálcio 1N a pH 7 e titulado com NaOH 0,01N, conforme descrito em Embrapa (1997). A partir da soma dos cátions básicos mais a acidez potencial ($Al + H$) foi calculada a capacidade de troca de cátions potencial (CTC). O teor de carbono orgânico (Co) foi determinado pelo método Walkley-Black conforme Tedesco et al. (1995), sendo que a matéria orgânica (Mo) foi obtida multiplicando-se o teor de carbono orgânico por 1,724 (fator de van BEMMELEN). A estatística descritiva dos atributos físicos e químicos analisados são apresentados no Apêndice C.

5.4 Análises dos dados

Os valores obtidos dos atributos do solo foram analisados através da estatística descritiva calculando-se a média, desvio padrão, coeficiente de variação, coeficiente de assimetria e curtose. A normalidade da distribuição dos dados foi verificada através dos coeficientes de assimetria, curtose e teste de Kolmogorov-Smirnov. Para inspeção visual da normalidade de distribuição dos dados foram elaborados histogramas com curva normal e gráficos Box-plot para cada uma das variáveis analisadas utilizando os programas estatísticos Minitab -14 Statistical Software – Demo Version (MINITAB, 2003) e WinStat Sistema de Análise Estatística para Windows. Versão 2.0 – (MACHADO E CONCEIÇÃO, 2002).

Na avaliação da estrutura de dependência espacial foi usado o Software GS+, (GAMMA DESIGN SOFTWARE, 2004), que calcula o semivariograma experimental e teórico (modelo matemático) e seus respectivos parâmetros de ajuste (efeito pepita, C_0 ; patamar, C_0+C ; alcance, A ; coeficiente de determinação, r^2 e soma dos quadrados dos resíduos, SQR).

6 CAPÍTULO 1

FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA PONTUAIS GRAVIMÉTRICAS E VARIABILIDADE ESPACIAL DA RETENÇÃO DE ÁGUA EM SOLOS DE VÁRZEA

6.1 Introdução

Estudos que envolvem a dinâmica da água no sistema solo-planta-atmosfera tais como disponibilidade de água no solo para as culturas, infiltração, drenagem, estresse hídrico e movimento de solutos no solo necessitam do conhecimento da relação entre o conteúdo de água no solo e o potencial matricial (ou tensão), representada pela curva de retenção de água no solo. Entretanto, a elaboração desta curva é laboriosa, de custo elevado e demanda muito tempo (VERECKEN, 1995; MCBRATNEY et al., 2002). Bouma (1989) introduziu o conceito de Função de Pedotransferência (FPT) que está relacionado à estimativa de atributos mais difíceis e que requerem maior tempo na sua determinação a partir de atributos facilmente e rotineiramente determinados em laboratório.

As FPTs, segundo Wösten et al. (2001), têm sido desenvolvidas para estimar pontos específicos da curva de retenção de água no solo e a condutividade hidráulica do solo saturado (ditas FPTs pontuais) e os parâmetros dos modelos de curva de retenção de água no solo propostos por Brooks & Corey (1964) e van Genuchten (1980) (ditas FPTs paramétricas). Entretanto, a maior parte delas tem sido desenvolvida para solos em condições de clima temperado e desta forma levanta-se um primeiro questionamento se elas podem ou não ser aplicadas para solos em condições de clima tropical?

No Brasil são escassos os trabalhos que apresentam FPTs desenvolvidas para solos em condições tropicais e principalmente para solos de várzeas. Dentre eles pode-se citar: Arruda et al. (1987), Tomasella et al. (2000) e Oliveira et al. (2002). Na literatura estrangeira podem ser destacados os trabalhos de Pidgeon (1972), Lal (1979), Aina & Periaswamy (1985), Dijkerman (1988) e Van den Berg et al. (1997). Um segundo questionamento surge sobre a aplicabilidade e a transferabilidade destas FPTs já desenvolvidas para solos tropicais, ou seja, será que elas poderão ser aplicadas e produzirão resultados satisfatórios para solos tropicais que não fazem parte do banco de dados do qual foram geradas ? Se sim, surge um terceiro questionamento: estas FPTs são capazes de descrever a estrutura de variabilidade espacial dos atributos estimados?

Romando & Santini (1997) avaliaram o potencial das FPTs desenvolvidas por Gupta & Larson (1979), Rawls et al. (1982), Rawls & Brakensiek (1989) e Vereecken et al. (1989) para descrever a estrutura de variabilidade espacial, utilizando ferramentas geoestatísticas, da retenção de água no solo em uma transeção espacial de 5,0km com 100 amostras espaçadas de 50m, na região de Guardia Perticara na Itália. Os autores concluíram que a análise geoestatística mostrou que existem fortes similaridades nas estruturas de variabilidade espacial detectadas pelas FPTs avaliadas. Entretanto, os semivariogramas construídos a partir dos dados estimados pelas FPTs diferiram dos semivariogramas construídos a partir dos dados medidos de conteúdo de água volumétrico os quais foram ajustados ao modelo de van Genuchten (1980).

Buscando responder os questionamentos levantados, este trabalho teve como objetivo avaliar a aplicabilidade e a transferabilidade de oito FPTs pontuais desenvolvidas para estimar o conteúdo gravimétrico de água no solo nas tensões de 33kPa e 1500kPa e sua capacidade de descrever a estrutura de dependência espacial da variável resposta, a partir de um conjunto de dados coletados em um solo de várzea no município de Capão do Leão – RS, por meio de ferramentas geoestatísticas.

6.2 Material e Métodos

Em uma área de 1,0 ha situada no município do Capão do Leão – RS foi demarcada uma malha experimental com pontos espaçados de 10m x 10m,

totalizando 100 pontos amostrais (Fig. 5). Os solos encontrados na área foram classificados em duas classes taxonômicas, nas partes relativamente altas do microrelevo como Planossolo Háplico eutrófico gleissólico e nas partes relativamente baixas como Gleissolo Háplico eutrófico solódico (EMBRAPA, 2006), apresentando relevo plano, desenvolvido a partir de sedimentos recentes originados de rochas graníticas. São solos imperfeitamente a mal drenados e compõem, juntamente com outros grupos de solos, os solos de várzea do Rio Grande do Sul. A área, pertencente à Estação Experimental de Terras Baixas da Embrapa Clima Temperado, foi cultivada nas últimas três safras agrícolas com as culturas do arroz irrigado (dois anos) e sorgo granífero (um ano), ambas no sistema convencional. O clima na região, conforme classificação de Köppen, é o Cfa, sendo o local representativo de um ambiente subtropical, marítimo, de verão subúmido e o resto do ano úmido ou superúmido.

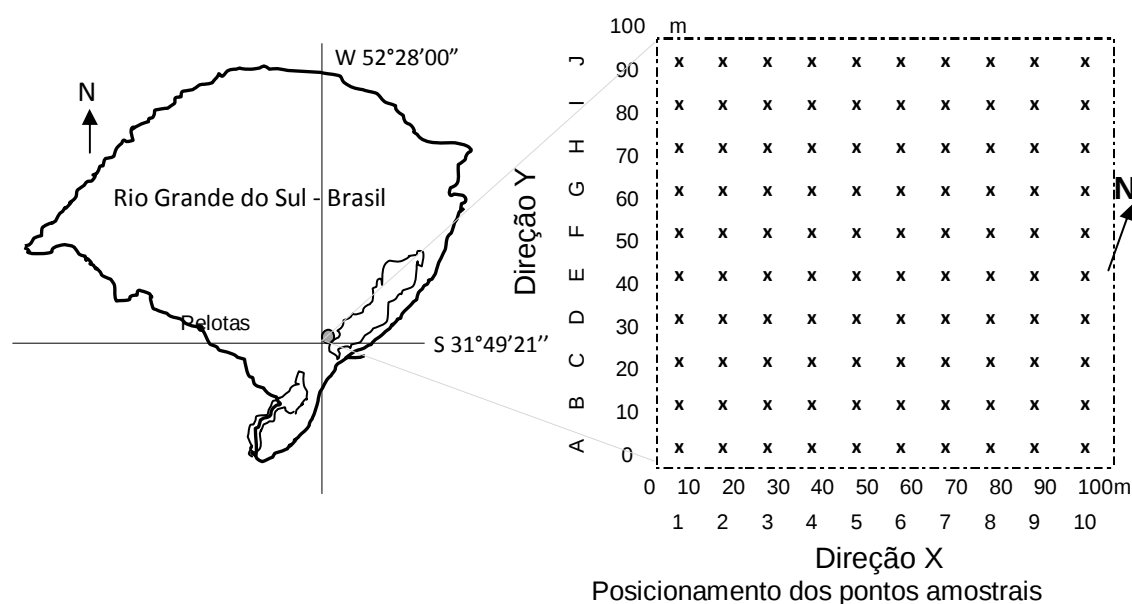


Figura 5 - Localização da região e ilustração da malha experimental de 100 pontos.

Em cada ponto da malha foram coletadas amostras de solo com estrutura preservada utilizando-se anel volumétrico de 0,05m de diâmetro e 0,03m de altura na profundidade de 0,075m para determinação da curva de retenção de água no solo (tensões de 0, 1, 6, 10, 33, 100 e 1500kPa), densidade do solo e porosidade total do solo (EMBRAPA, 1997). Nos mesmos locais, na camada de 0 - 0,20m, também foram coletadas amostras deformadas para determinação da granulometria

(frações areia, silte e argila) seguindo o método da pipeta descrito em Gee e Bauder (1986), utilizando hidróxido de sódio 1N como agente dispersante.

Segundo metodologias descritas em Tedesco et al. (1995), foram determinados os seguintes atributos químicos do solo: pH em água, Alumínio, Potássio, Cálcio, Magnésio e Sódio trocáveis. A acidez potencial (H + Al) foi determinada com o uso de acetato de cálcio 1N a pH 7 e titulado com NaOH 0,01N, conforme descrito em Embrapa (1997). A partir da soma dos cátions básicos mais a acidez potencial (Al + H) foi calculada a capacidade de troca de cátions potencial (CTC). O teor de carbono orgânico (Co) foi determinado pelo método Walkley-Black conforme Tedesco et al. (1995), sendo que a matéria orgânica (Mo) foi obtida multiplicando-se o teor de carbono orgânico por 1,724 (fator de van BEMMELEN).

As oito FPTs pontuais avaliadas, desenvolvidas para estimar o conteúdo gravimétrico de água nas tensões de 33 e 1500kPa, são descritas na tab. 1.

Tabela 1 – Funções de Pedotransferência pontuais avaliadas neste estudo.

Autor	Função de Pedotransferência
Pidgeon (1972)	$Ug_{33} = (0,0361 + 0,0016 \text{ Silte} + 0,003 \text{ Arg} + 0,03 \text{ Co})/0,95$ $Ug_{1500} = [- 4,19 + 0,19 \text{ Silte} + 0,39 \text{ Arg} + 1,8 \text{ Co}] / 100$
Lal (1979)	$Ug_{33} = 0,334 - 0,003 \text{ Areia}$ $Ug_{1500} = 0,247 - 0,003 \text{ Areia}$
Arruda et al. (1987)	$Ug_{33} = [3,07439 + 0,629239 (\text{Silte} + \text{Arg}) - 0,00343813 (\text{Silte} + \text{Arg})^2] / 100$ $Ug_{1500} = [398,889(\text{Silte} + \text{Arg}) / 1308,09 + (\text{Silte} + \text{Arg})] / 100$
Dijkerman (1988)	$Ug_{33} = [36,97 - 0,35 \text{ Areia}] / 100$ $Ug_{1500} = [0,74 + 0,39 \text{ Arg}] / 100$
Bell e van K. (1995)	$Ug_{1500} = (- 0,992 + 0,351 \text{ Arg} + 0,047 \text{ Mo}) / 100$
Bell e van K. (1996)	$Ug_{33} = (48,7 + 0,974 \text{ Mo} - 28,3 \text{ Ds} - 0,14 \text{ Arg}) / 100$
Oliveira et al. (2002)	$Ug_{33} = 0,0000333 \text{ Silte} + 0,0000387 \text{ Arg}$ $Ug_{1500} = 3,8 \times 10^{-6} \text{ Areia} + 1,53 \times 10^{-5} \text{ Silte} + 3,4 \times 10^{-5} \text{ Arg} - 0,03086 \text{ Ds}$
Solano (2003)	$Ug_{33} = 11,88 \times 10^{-3} + 27,69 \times 10^{-6} \text{ Arg} + 23,35 \times 10^{-6} \text{ Silte} + 24,6 \times 10^{-4} \text{ Mo}$ $Ug_{1500} = - 0,01368 + 22,619 \times 10^{-6} \text{ Arg} + 14,09 \times 10^{-6} \text{ Silte} + 0,00123 \text{ Mo}$
Urach (2007)	$Ug_{33} = 0,643 - 0,00238 \text{ Areia} - 0,26767 \text{ Ds}$ $Ug_{1500} = 0,462 - 0,0022 \text{ Areia} - 0,00074 \text{ Silte} - 0,1838 \text{ Ds}$

Ug_{33kPa} e $Ug_{1500kPa}$ = conteúdo de água gravimétrico (kg.kg^{-1}) nas tensões de 33 e 1500kPa; Arg, Silte, areia = teores de argila, silte e areia no solo, respectivamente (%); Mo = conteúdo de matéria orgânica no solo (g.kg^{-1}); Co = carbono orgânico no solo (%); Ds = densidade do solo (Mg.m^{-3}); CTC = capacidade de troca de cátions potencial (cmol.kg^{-1}).

Os indicadores estatísticos utilizados para avaliar o desempenho das FPTs foram o erro médio (ME, equação 1), a raiz quadrada do erro médio ao quadrado (RMSE, equação 2) e o coeficiente de determinação r^2 .

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (e_i - m_i) \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (e_i - m_i)^2} \quad (2)$$

onde: n = número de pontos amostrais (100); e_i = valor estimado da variável resposta pela FPT e m_i = valor medido da variável. O ME é um indicador da exatidão da estimativa, revelando a tendência da FPT de superestimar os valores se positivo ou de subestimar se negativo, enquanto que o RMSE quantifica a dispersão dos valores medidos e estimados em torno da linha 1:1. Os valores estimados pelas FPTs e os medidos de cada variável também foram plotados em gráficos 1:1 para uma inspeção visual do desempenho das mesmas.

A partir dos resultados destes indicadores as FPTs foram classificadas (ordenadas) conforme o menor valor absoluto de ME e de RMSE e o maior valor de r^2 . Foram atribuídos valores de 1 (melhor desempenho) a 8 (pior desempenho) para cada índice por FPT e a soma dos valores de cada índice foi utilizada como critério para selecionar a FPT com melhor desempenho (CORNELIS et al., 2001). A partir disso foi atribuída a classificação 1 (clas. 1) para a que apresentasse o menor valor desta soma e a classificação 8 (clas. 8) para o maior. No caso de somas iguais foi atribuída a menor classificação para a FPT que apresentasse o melhor desempenho quanto ao ME (menor valor absoluto). Para a seleção da FPT com melhor desempenho nas duas tensões avaliadas foram somados os valores obtidos da classificação em cada uma das tensões, e a FPT com menor valor desta soma foi definida como sendo a de melhor desempenho geral. No caso de somas iguais foi adotado o mesmo critério de desempate adotado para a classificação em cada tensão avaliada.

Para avaliar a capacidade de cada FPT de descrever a estrutura de dependência espacial da variável resposta foi aplicada a análise geoestatística

(JOURNEL & HUIJBREGTS, 1978; VIEIRA, 2000) que tem o semivariograma (equação 3) como a ferramenta chave para quantificar a dependência espacial entre os dados:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Ug(x_i) - Ug(x_{i+h})]^2 \quad (3)$$

onde $\gamma(h)$ é o valor da semivariância experimental; $N(h)$ é o número de pares de dados separados pela distância h ; e $Ug(x_i)$ e $Ug_h(x_{i+h})$ são os valores da variável nos pontos x_i e x_{i+h} , respectivamente.

Todos os semivariogramas experimentais foram ajustados ao modelo matemático esférico (JOURNEL & HUIJBREGTS, 1978) no intuito de facilitar a avaliação do desempenho de cada FPT em descrever a estrutura de variabilidade, cujas equações são:

$$\begin{aligned} \gamma^*(h) &= C_0 + C \left[1.5 \left(\frac{h}{a} \right) - 0.5 \left(\frac{h}{a} \right)^3 \right]; \text{ se } 0 \leq h \leq a \\ \gamma^*(h) &= C_0 + C; \text{ se } h > a \end{aligned} \quad (5)$$

onde: $\gamma^*(h)$ é o valor da semivariância estimada; C_0 = efeito pepita; C_0+C = patamar; A = alcance. Durante a análise geoestatística foram ajustados somente modelos isotrópicos, considerando que a variação espacial é igual em todos os sentidos. Para analisar o grau de dependência espacial da variável, utilizou-se a classificação proposta por Cambardella et al. (1994) a qual considera o grau de dependência espacial forte quando a relação $C_0/(C_0+C) \leq 25\%$, moderado quando a relação $25 < C_0/(C_0+C) \leq 75\%$ e fraco quando a relação $C_0/(C_0+C) > 75\%$. A técnica de validação cruzada foi utilizada para verificar a qualidade de ajuste do modelo esférico ao semivariograma experimental, sendo os seus resultados avaliados por meio do coeficiente de determinação (r^2) da regressão entre os valores estimados e os medidos e pelo coeficiente de regressão (CR), que expressa o quanto se aproxima a reta de regressão da linha 1:1. A análise exploratória dos conjuntos de dados (estatística descritiva) e a análise geoestatística foi executada por meio do software GS+ versão 7 (GAMMA DESIGN SOFTWARE, 2004).

6.3 Resultados e discussão

Da análise do desempenho das FPTs testadas para estimar os conteúdos gravimétricos de água no solo nas tensões de 33kPa, e 1500kPa (tab.2), utilizando os indicadores estatísticos ME, RMSE e r^2 bem como a classificação de cada FPT, baseado na metodologia proposta por Cornelis et al. (2001), verifica-se que a maioria das FPTs apresentaram tendência de superestimar os valores da U_{g33kPa} , com exceção da FPT de Urach (2007), e de subestimar os valores para $U_{g1500kPa}$, com exceção da FPT de Arruda et al. (1987), o que pode ser constatado pelo sinal de ME (equação 1 e tab. 2).

Para a estimativa da U_{g33kPa} a FPT desenvolvida por Oliveira et al. (2002) apresentou o melhor desempenho do que as demais testadas, comprovado pelos menores valores de ME (0,0136) e RMSE (0,0197). Já para a estimativa dos valores de $U_{g1500kPa}$, a FPT de Pidgeon (1972) apresentou o melhor desempenho confirmado pelos menores valores de ME (-0,0054) e RMSE (0,0216) e, neste caso, também pelo maior coeficiente r^2 (26,1%) (tab. 2).

Tabela 2 – Desempenho das FPTs na estimativa da U_{g33kPa} e $U_{g1500kPa}$ avaliadas pelos indicadores estatísticos erro médio (ME), raiz quadrada do erro médio ao quadrado (RMSE), coeficiente de determinação (r^2).

FPTs (autor)	Ug33kPa				Ug1500kPa			
	ME	RMSE	r^2	Clas.	ME	RMSE	r^2	Clas.
Pidgeon (1972)	0,0151	0,0209	36,5	3	-0,0054	0,0216	26,1	1
Lal (1979)	0,0219	0,0261	38,7	2	-0,0074	0,0222	25,2	2
Arruda et al. (1987)	0,0957	0,0967	37,4	8	0,0417	0,0466	25,1	5
Dijkerman (1988)	0,0348	0,0375	38,7	5	-0,0537	0,0584	8,9	6
Bell & van Keulen (1995)	-----	-----	----	----	-0,0667	0,0706	12,0	7
Bell & van Keulen (1996)	0,0430	0,0494	38,4	6	-----	-----	----	----
Oliveira et al. (2002)	0,0136	0,0197	38,3	1	-0,0391	0,0448	20,6	4
Solano (2003)	0,0215	0,0257	37,9	4	-0,0164	0,0269	26,1	3
Urach (2007)	-0,0691	0,0714	47,2	7	-0,0794	0,0832	10,2	8

Clas. = classificação da FPT, ME ($g.g^{-1}$), RMSE ($g.g^{-1}$) e r^2 (%).

Baseado no critério de classificação adotado, para ambas as tensões, a FPT de Pidgeon (1972) foi a que apresentou o melhor desempenho (clas. = 1), enquanto que a de Urach (2007) o pior desempenho (clas. = 8).

Tomasella & Hodnett (2004) testaram o desempenho das FPTs pontuais gravimétricas de Arruda et al. (1987), Dijkerman (1988), Lal (1979), Oliveira et al. (2002) e Pidgeon (1972) utilizando um banco de dados de solos tropicais composto de 249 perfis de solos (total de 771 horizontes) oriundos de 22 países que pertencem a base de dados IGBP-DIS/ISRIC. Os autores concluíram que uma das razões que conduz uma FPT a falhar na estimativa do conteúdo de água pode estar relacionada à simplicidade de sua equação com um número limitado de variáveis explanatórias e limitada abrangência.

Urach (2007) utiliza a densidade do solo como variável preditora para estimativa do conteúdo de água em ambas as tensões (tab. 1), sendo que sua faixa de variação no banco de dados utilizados por este autor foi de $0,88\text{Mg.m}^{-3}$ a $1,51\text{g.cm}^{-3}$. No presente estudo, além de ter sido encontrada uma baixa correlação ($r = -0,18$, não significativa, $p\text{-valor} > 0,05$) (APÊNDICE D), com o conteúdo de água na tensão de 1500kPa, a faixa de variação de D_s foi de $1,36\text{Mg.m}^{-3}$ a $1,75\text{Mg.m}^{-3}$ na camada de 0-0,20m. Ambos os fatos podem ser as razões pelas quais esta FPT apresentou o pior desempenho neste estudo. Já a de Pidgeon (1972) utiliza como variáveis preditoras os teores de silte, argila e carbono orgânico, para ambas as tensões, que apresentaram correlações significativas a 1% ($p\text{-valor} < 0,001$) de 0,45, 0,30 e 0,37 (APÊNDICE D), respectivamente, com a tensão de 1500kPa. A retenção de água na tensão de 1500kPa, considerada na literatura como a tensão correspondente ao ponto de murcha permanente (PMP) (HILLEL, 1980; REICHARDT & TIMM, 2004), está relacionada principalmente a adsorção de água nas partículas do solo, a qual está associada com as cargas desenvolvidas nos minerais da argila, na presença de matéria orgânica e na saturação de cátions (HODNETT & TOMASELLA, 2002; TESSIER et al. 1999; RAWLS et al., 2003; BAUER & BLACK, 1992; PACHEPSKY & RAWLS, 1999).

Os valores medidos de U_{g33kPa} e $U_{g1500kPa}$ e estimados pelas FPTs com melhor desempenho foram plotados em gráficos de dispersão com linha 1:1 (Fig. 6a e 6b) para analisar o comportamento destas FPTs.

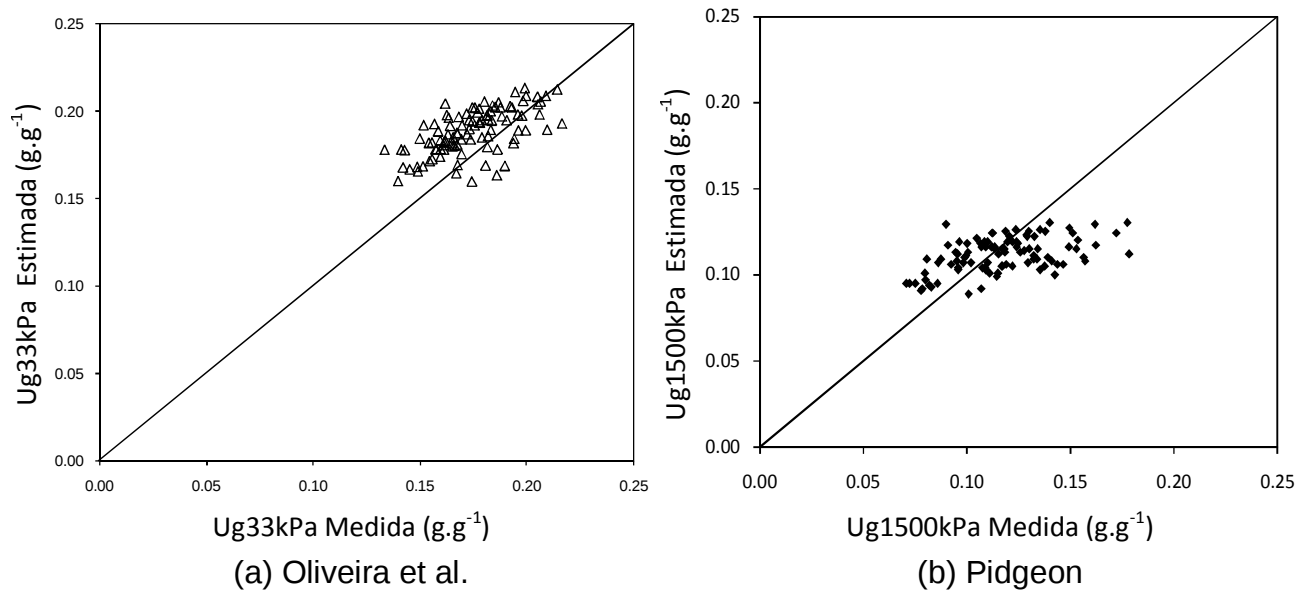


Figura 6- Gráficos 1:1 dos valores medidos de Ug33kPa e estimados pela FPT de Oliveira et al.(a) e dos valores medidos de Ug1500kPa e estimados pela FPT de Pidgeon (b).

Embora a FPT de Oliveira et al. (Fig. 6a) tenha apresentado os menores valores de ME e RMSE (tab. 2) na estimativa de Ug33kPa, a maior parte dos pontos cai afastado da linha 1:1 demonstrando seu baixo desempenho. O mesmo comportamento foi encontrado para a FPT de Pidgeon (1972) na estimativa dos valores de Ug1500kPa (Fig. 6b).

Bell & van Keulen (1995), para solos do México, utilizaram a argila e a matéria orgânica como variáveis preditoras, entretanto sua FPT teve um dos mais baixos desempenhos na estimativa do conteúdo de água a 1500kPa (clas. = 7, tab. 2). Entretanto, Pidgeon (1972), que também utilizou argila, carbono orgânico do solo e acrescentou o teor de silte em sua FPT como variáveis preditoras, obteve o melhor desempenho (clas. = 1). Esse contraste pode estar relacionado à mineralogia da fração argila dos solos utilizados para o desenvolvimento e validação das FPTs, onde Bell & van Keulen utilizaram quatro solos com predominância de argilas 2:1 e Pidgeon utilizou três solos de argilas 2:1 (ilita e montmorilonita) e oito solos com absoluto predomínio de argilas 1:1 (caulinita), que é semelhante à mineralogia da fração argila do solo de várzea utilizado neste estudo, que possui, segundo Castilhos et al. (2002), predomínio de caulinita.

Gaiser et al. (2000) comentam que a mineralogia da fração argila determina a quantidade de água que o solo pode reter e diferentes estruturas cristalinas entre os argilo-minerais fazem com que a sua capacidade de reter água também seja

diferente. Outra provável explicação para o fraco desempenho das FPTs em estimar o conteúdo de água está relacionada à forma relativamente simples destas com um número limitado de variáveis independentes, conforme destacado anteriormente.

Neste estudo as FPTs de Dijkerman (1988) e Lal (1979) são exemplos onde foram utilizados somente a argila e a areia, respectivamente, para estimar o conteúdo de água no PMP. A argila como único preditor do conteúdo de água na tensão de 1500kPa parece ser insuficiente neste estudo devido a sua baixa correlação ($r = 0,30$) com esta tensão, quando comparada a correlação da fração areia e esta tensão ($r = -0,50$), e sua pequena faixa de variação que é de 11,66 a 18,13%. Por outro lado, um comportamento interessante é o bom desempenho da FPT de Lal para Ug1500 kPa, que utiliza apenas a areia como variável preditora, o que pode estar relacionado, além da presença de alguns solos hidromórficos no conjunto de solos utilizados, ao maior percentual da areia na composição textural do solo de várzea utilizado neste estudo, variando de 38,47 a 54,04 %, e pelo alto coeficiente de correlação entre a areia e as variáveis silte ($r = -0,94$), argila ($r = -0,49$) e carbono orgânico ($r = -0,60$) (APÊNDICE E), o que muito provavelmente faz com que a areia represente indiretamente o efeito destas outras variáveis na FPT.

Antes da aplicação da ferramenta geoestatística, foi realizada a análise exploratória do conjunto de dados medidos e estimados de Ug33kPa e Ug1500kPa pelas FPTs por meio da estatística descritiva (tab. 3), bem como verificada a normalidade da distribuição dos dados por meio do teste de Kolmogorov-Smirnov.

Observa-se que o coeficiente de variação CV dos valores medidos de Ug33kPa (10,4%) e Ug1500kPa (20,7%) é maior que os valores de CV dos valores estimados pelas FPTs, exceto para a FPT de Bell & van Keulen (1996) para Ug33kPa e Urach (2007) para as duas tensões, i.e. a maior parte das FPTs testadas tendem a suavizar o comportamento dos valores estimados de Ug33kPa e Ug1500kPa. Resultados similares foram encontrados por Romano & Santini (1997) que testaram duas funções de pedotransferência pontuais (GUPTA & LARSON, 1979 e RAWLS et al., 1982) e duas paramétricas (RAWLS & BRAKENSIEK, 1989 e VEREECKEN et al., 1989). Como pode ser constatado na literatura (p.e. Timm et al., 2006) há uma tendência de aumento dos valores de CV a medida que o solo vai secando (tab. 3).

Tabela 3 – Análise exploratória do conjunto de dados medidos de Ug33kPa e Ug1500kPa e os estimados pelas FPTs, para os 100 pontos experimentais.

FPT	Média (kg.kg ⁻¹)	Mdna. (kg.kg ⁻¹)	Mínimo (kg.kg ⁻¹)	Máximo (kg.kg ⁻¹)	Desvio Padrão	CV*	Assim.	Curt.	K-S**
Ug33 kPa									
Medido	0,175	0,174	0,134	0,216	0,018	10,4	0,13	-0,46	0,052
FPTs									
Pidgeon	0,190	0,191	0,169	0,209	0,010	5,1	-0,12	-0,57	0,059
Lal	0,197	0,197	0,172	0,219	0,011	5,7	-0,20	-0,67	0,062
Arruda	0,270	0,271	0,247	0,288	0,010	3,6	-0,39	-0,54	0,076
Dijkerman	0,209	0,210	0,181	0,235	0,013	6,2	-0,20	-0,67	0,062
Bell e van Keulen	0,218	0,217	0,147	0,301	0,031	14,3	0,14	-0,20	0,052
Oliveira	0,188	0,189	0,160	0,213	0,013	6,8	-0,24	-0,65	0,067
Solano	0,196	0,197	0,171	0,220	0,012	6,2	-0,01	-0,59	0,040
Urach	0,106	0,105	0,055	0,166	0,025	23,6	0,19	-0,45	0,049
Ug1500 kPa									
Medido	0,117	0,116	0,071	0,178	0,024	20,7	0,31	-0,24	0,047
FPTs									
Pidgeon	0,112	0,113	0,089	0,130	0,010	8,8	-0,26	-0,55	0,073
Lal	0,110	0,110	0,085	0,132	0,011	10,2	-0,20	-0,67	0,062
Arruda	0,159	0,159	0,135	0,179	0,010	6,6	-0,21	-0,66	0,063
Dijkerman	0,063	0,064	0,053	0,078	0,005	8,1	0,08	-0,16	0,053
Bell e van Keulen	0,050	0,051	0,041	0,064	0,005	9,7	0,06	-0,10	0,055
Oliveira	0,078	0,078	0,062	0,091	0,007	9,2	-0,36	-0,53	0,082
Solano	0,101	0,101	0,085	0,115	0,007	7,3	-0,13	-0,60	0,054
Urach	0,038	0,038	0,003	0,080	0,017	45,3	0,17	-0,41	0,054

Mdna. = Mediana *CV = coeficiente de variação (%); Assim. = coeficiente de assimetria; Curt. = curtose; ** K-S= teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov (valor crítico = 0,121, para $\alpha=10\%$).

Baseado no teste de Kolmogorov-Smirnov, tanto a distribuição dos valores medidos de Ug33kPa e Ug1500kPa como a dos estimados pelas FPTs tendem a distribuição normal já que os valores calculados desta estatística são menores que o valor crítico ao nível de 10% de significância. Este fato pode ser corroborado pelos baixos valores de assimetria calculados em cada conjunto de dados (tab. 3). Todos os coeficientes de curtose calculados são negativos indicando um maior achatamento da distribuição dos dados, classificando as distribuições como platicúrticas.

O teste F de Fischer foi aplicado em cada conjunto de dados estimados contra os dados medidos, para testar a hipótese de homoscedasticidade, ou variância igual entre as duas amostras, tendo apresentado valores maiores que o

valor crítico de F ao nível de significância 1% em todos os casos, ou seja, a variância do conjunto de dados medidos e a variância de cada conjunto de dados estimados pelas FPTs são diferentes. Também foi aplicado o teste t, ao nível de significância de 5%, no intuito de comparar a média dos valores de umidade medidos com a média de cada conjunto de dados estimados pelas FPTs. Todos os resultados demonstraram que a hipótese de igualdade de médias deve ser rejeitada, i.e., cada conjunto de dados estimados pelas FPTs e o conjunto de dados medidos, sob o ponto de vista estatístico, não provêm da mesma população.

6.3.1 Análise da variabilidade espacial

Os resultados da análise geoestatística são apresentados na tab. 4, na qual é encontrada a variância dos dados medidos de Ug33kPa e Ug1500kPa e estimados pelas FPTs juntamente com os parâmetros do semivariograma teórico esférico (efeito pepita C0; patamar C0+C e alcance A) ajustado ao semivariograma experimental bem como o coeficiente de determinação r^2 do ajuste. Também é apresentado o Grau de Dependência Espacial (GDE, CAMBARDELLA et al., 1994) e os resultados do procedimento de validação cruzada (r^2 e coeficiente da regressão CR) que foi aplicado para verificar a qualidade do ajuste do semivariograma ajustado.

Observa-se que houve uma boa correspondência entre os valores da variância e do patamar (semivariância total), tanto para o conjunto de dados medidos como para os estimados pelas FPTs, o que pode indicar uma ausência de tendência nas séries de dados espaciais (ROMANO & SANTINI, 1997).

A distância da correlação espacial para Ug33kPa, expressa pelo alcance, calculada para os dados estimados pelas FPTs de uma maneira geral foram 16% maiores do que o encontrado para os dados medidos, com exceção da FPT de Bell & van Keulen (1996) onde o valor encontrado de alcance foi 21% maior. A FPT de Dijkerman (1988) foi a que propiciou o valor de alcance mais próximo ao valor do alcance dos dados medidos (2,0% maior).

Quanto aos valores calculados de GDE, pode-se classificar o grau como moderado para os dados medidos de Ug33kPa (32,6%) e estimados pelas FPTs de Bell & van Keulen (40,0%) e de Urach (30,7%), enquanto que para as demais FPTs o GDE é classificado como de forte dependência espacial ($GDE \leq 25\%$).

Tabela 4 – Variância dos dados medidos de Ug33kPa e Ug1500kPa e estimados pelas FPTs, parâmetros geoestatísticos e os resultados da validação cruzada.

FPT	Variância	Semivariância		Alcance (A)	r ^{2*}	GDE (%)	Valid. cruzada	
		Efeito pepita (C0)	Patamar (C)				r ²	CR
Ug33kPa								
Medido	3,5x10 ⁻⁴	1,27x10 ⁻⁴	3,9x10 ⁻⁴	38,50	0,989	32,6	0,313	0,981
Pidgeon	1,1x10 ⁻⁴	1,0x10 ⁻⁵	1,1x10 ⁻⁴	41,80	0,987	9,1	0,644	1,009
Lal	1,3x10 ⁻⁴	7,0x10 ⁻⁶	1,4x10 ⁻⁴	41,60	0,985	5,2	0,682	0,962
Arruda et al.	9,5x10 ⁻⁵	3,0x10 ⁻⁶	9,5x10 ⁻⁵	42,50	0,984	3,2	0,798	1,017
Dijkerman	1,8x10 ⁻⁴	1,0x10 ⁻⁵	1,8x10 ⁻⁴	39,20	0,982	5,6	0,701	0,980
Bell e van K.	9,6x10 ⁻⁴	4,0x10 ⁻⁴	1,0x10 ⁻³	46,70	0,941	40,0	0,320	0,953
Oliveira et al.	1,7x10 ⁻⁴	6,0x10 ⁻⁶	1,7x10 ⁻⁴	41,20	0,988	3,5	0,698	0,986
Solano	1,6x10 ⁻⁴	6,0x10 ⁻⁶	1,7x10 ⁻⁴	41,70	0,985	3,6	0,702	1,011
Urach	6,2x10 ⁻⁴	1,88x10 ⁻⁴	6,1x10 ⁻⁴	44,80	0,990	30,7	0,391	0,937
Ug1500kPa								
Medido	5,8x10 ⁻⁴	4,0x10 ⁻⁵	6,2x10 ⁻⁴	27,90	0,993	6,4	0,383	0,861
Pidgeon	1,1x10 ⁻⁴	4,0x10 ⁻⁶	1,3x10 ⁻⁴	39,70	0,978	3,1	0,683	1,014
Lal	1,3x10 ⁻⁴	1,0x10 ⁻⁵	1,4x10 ⁻⁴	42,50	0,972	7,0	0,761	1,005
Arruda et al.	1,1x10 ⁻⁴	2,0x10 ⁻⁶	1,1x10 ⁻⁴	42,20	0,979	1,8	0,800	1,021
Dijkerman	3,0x10 ⁻⁵	4,0x10 ⁻⁶	3,1x10 ⁻⁵	19,10	0,391	12,9	0,090	0,407
Bell e van K.	2,4x10 ⁻⁵	1,7x10 ⁻⁶	2,0x10 ⁻⁵	22,10	0,477	8,6	0,264	0,678
Oliveira et al.	5,1x10 ⁻⁵	2,7x10 ⁻⁶	4,7x10 ⁻⁵	40,10	0,999	5,7	0,681	0,986
Solano	5,0x10 ⁻⁵	6,0x10 ⁻⁶	5,3x10 ⁻⁵	37,30	0,991	11,3	0,663	0,997
Urach	3,0x10 ⁻⁴	8,3x10 ⁻⁵	2,9x10 ⁻⁴	46,00	0,992	29,0	0,458	0,979

r^{2*} = coeficiente de ajuste do modelo; GDE = grau de dependência espacial $[(Co/Co+C)*100]$; r^2 = coeficiente de determinação da validação cruzada; CR= coeficiente de regressão entre os valores medidos e determinados durante o processo de validação cruzada.

Para os dados de Ug1500kPa, a análise geoestatística das séries de dados de umidade gravimétrica medida e estimada pelas FPTs (tab. 4) detectou também uma semelhança entre o comportamento da variância experimental e do patamar (Co+C). O alcance da correlação espacial para os valores medidos de Ug1500kPa foi de 27,90m enquanto que os valores estimados pelas FPTs de Urach e Dijkerman apresentaram o maior (64,8% maior do que o alcance obtido para os dados medidos) e o menor (31,5% menor que o alcance dos dados medidos) valor do alcance de dependência espacial, respectivamente.

A FPT de Bell & van Keulen propiciou o valor de alcance mais próximo do valor encontrado para os dados medidos (20,7% menor).

Exceto para a FPT de Urach, que apresentou um GDE moderado (29,0%), todas as demais FPTs tiveram os dados estimados de Ug1500kPa classificados como forte dependência espacial.

Os resultados da validação cruzada (tab. 4) indicam que o semivariograma ajustado para os dados medidos de Ug33kPa ($r^2 = 0,313$ e CR = 0,981) e Ug1500kPa ($r^2 = 0,383$ e CR = 0,861) foram descritos de uma maneira mais adequada pelos semivariogramas ajustados pelas FPTs propostas por Bell & van Keulen (1995 e 1996) e Urach (2007) nas quais os valores do coeficiente r^2 e CR foram mais próximos dos determinados para os dados medidos quando comparados as demais.

Os semivariogramas isotrópicos experimentais e teóricos (modelo esférico) para os dados medidos de Ug33kPa e estimados pelas FPTs testadas neste estudo são mostrados na Fig. 7.

Pode-se constatar que as FPTs desenvolvidas por Bell & van Keulen (1996) e Urach (2007) são as que melhor capturaram tanto o semivariograma experimental como o teórico dos valores medidos de Ug33kPa quando comparada as demais FPTs. Embora o valor do alcance calculado pelas FPTs de Bell & van Keulen (1996) e Urach (2007) ter sido superestimado em 21,3% e 16,4%, respectivamente, a semelhança na proporção entre o efeito pepita (C0) e o patamar (C), expressa pelo GDE, permitiu a boa similaridade entre os semivariogramas.

Observa-se também, que há uma forte semelhança entre os semivariogramas obtidos por meio das FPTs de Solano (2003) e de Lal (1979), tanto graficamente (Fig. 7) como nos parâmetros geoestatísticos ajustados (tab. 4), indicando que estas FPTs descrevem a estrutura de variabilidade espacial da variável estimada de forma semelhante, independente das variáveis preditoras utilizadas, pois neste caso, Lal utilizou apenas a areia e Solano os teores de argila, silte e matéria orgânica do solo.

Conforme pode ser visualizado, o comportamento dos semivariogramas experimentais e teóricos das FPTs desenvolvidas por Pidgeon (1972), Arruda et al. (1987), Dijkerman (1988) e Oliveira et al. (2002) são semelhantes, embora tenham sido utilizadas variáveis preditoras diferentes na estimativa de Ug33kPa.

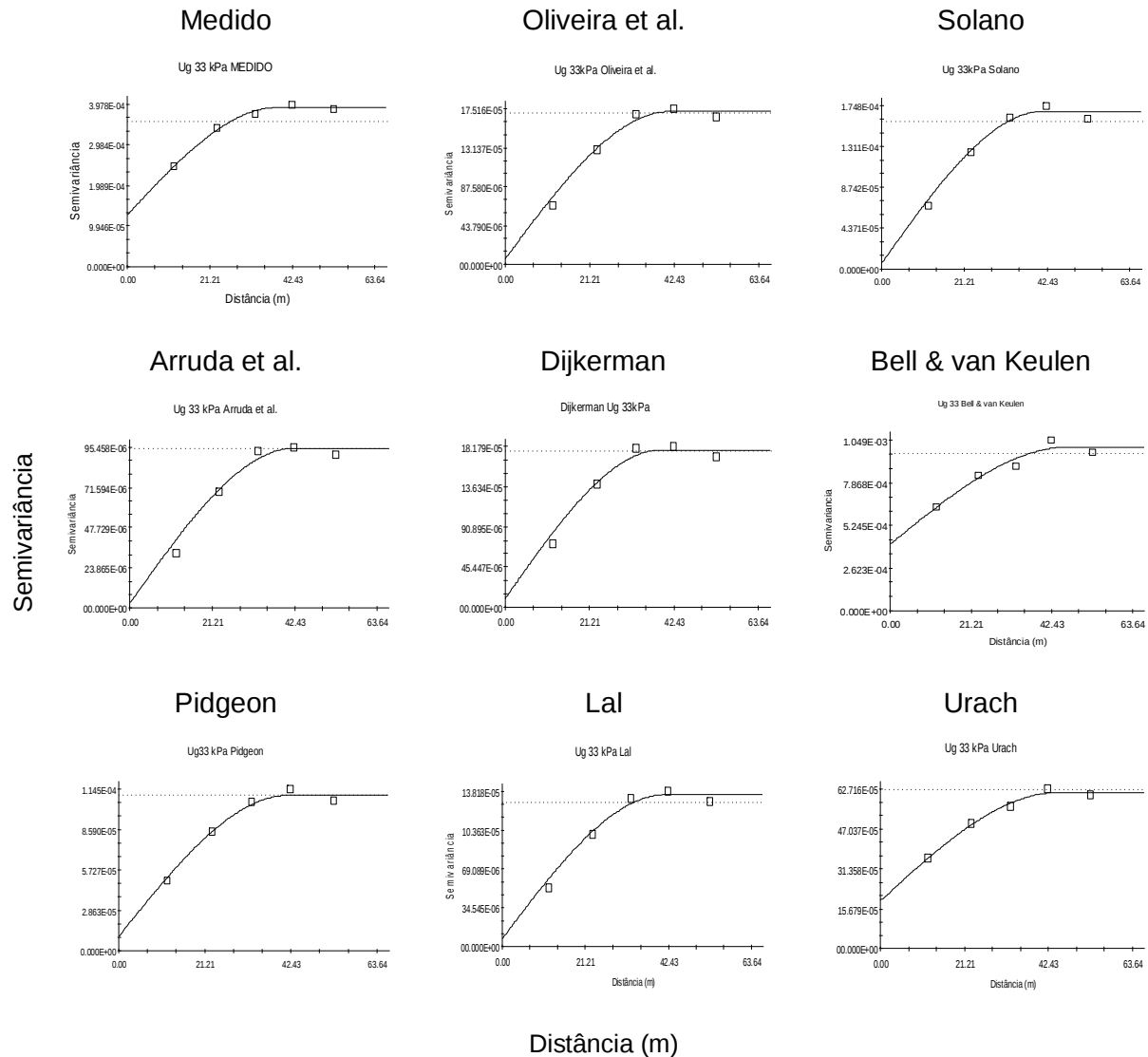


Figura 7- Semivariogramas isotrópicos experimentais e teóricos para os dados medidos de $Ug33kPa$ e estimados pelas FPTs avaliadas.

Os semivariogramas isotrópicos experimentais e teóricos (modelo esférico) para os dados medidos de $Ug1500kPa$ e estimados pelas FPTs testadas neste estudo são apresentados na Fig. 8, na qual se pode constatar que nenhuma das FPTs testadas captura o semivariograma experimental e o teórico dos valores medidos de $Ug1500kPa$. Em termos de alcance de dependência espacial, visualmente, os semivariogramas ajustados pelas FPTs desenvolvidas por Pidgion (1972), Lal (1979), Arruda et al. (1987), Oliveira et al. (2002), Solano (2003) e Urach (2007) apresentaram valores semelhantes para $Ug1500kPa$.

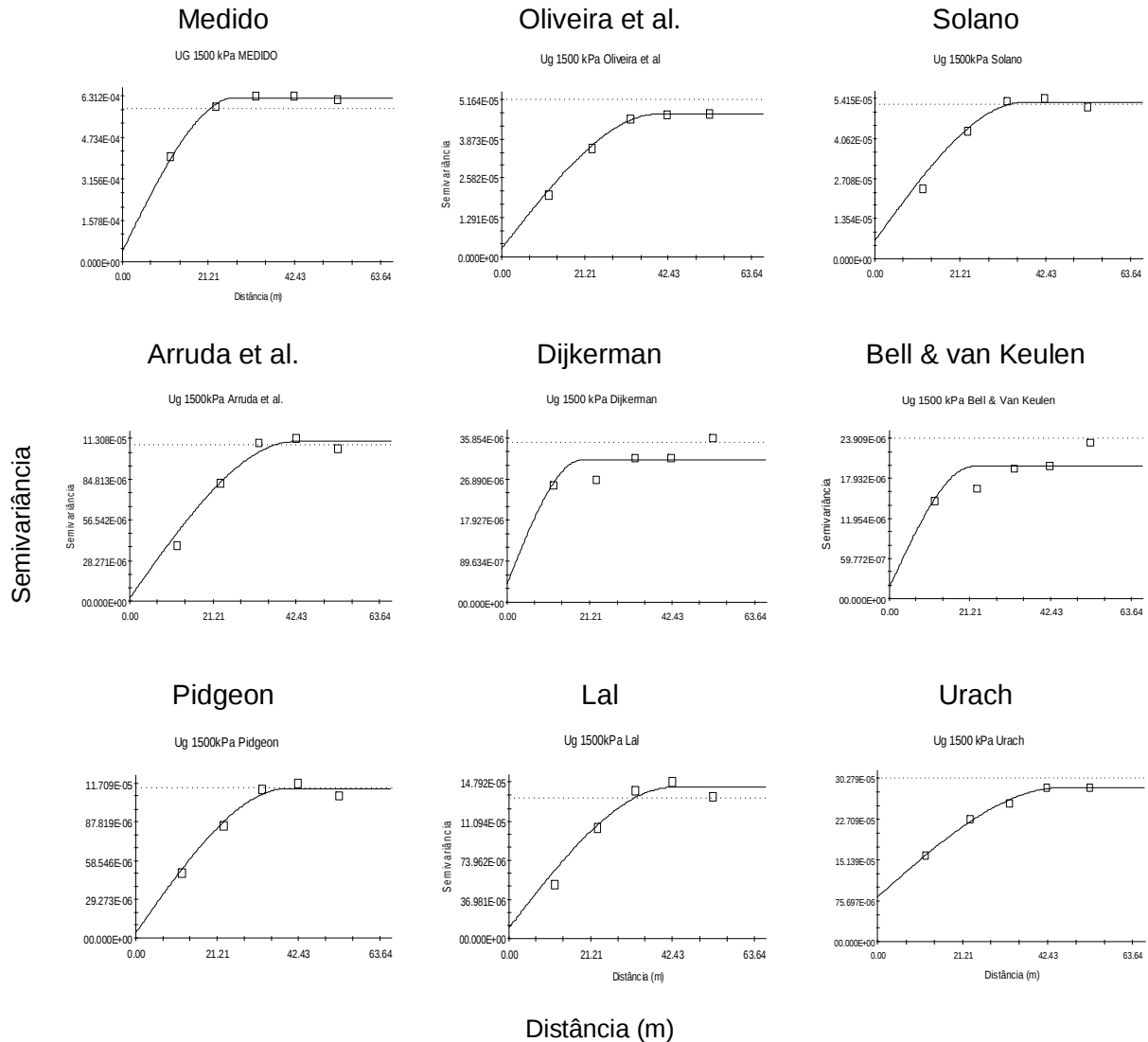


Figura 8- Semivariogramas isotrópicos experimentais e teóricos para os dados medidos de $U_g 1500 \text{ kPa}$ e estimados pelas FPTs avaliadas.

6.4 Conclusões

As FPTs testadas apresentaram tendência de superestimar os valores de $U_g 33 \text{ kPa}$ e de subestimar os de $U_g 1500 \text{ kPa}$.

Para a estimativa da $U_g 33 \text{ kPa}$, a FPT de Oliveira et al. (2002) apresentou melhor desempenho do que as demais, com $ME = 0,0136 \text{ g.g}^{-1}$.

A FPT de Pidgeon (1972) apresentou melhor desempenho do que as demais, para $U_g 1500 \text{ kPa}$, com $ME = -0,0054 \text{ g.g}^{-1}$.

A estrutura de variabilidade espacial do conjunto de dados medidos, foi parcialmente descrita pelas FPTs desenvolvidas por Bell & van Keulen (1995 e 1996) e Urach (2007), baseado nos resultados da validação cruzada.

6.5 Referências

- AINA, P. O.; PERIASWAMY, S. P. Estimating available water-holding capacity of Wester Nigerian soils from soil texture and bulk density using core and sieved samples. **Soil Science**, v.140, p.55-58, 1985.
- ARRUDA, F.B.; ZULLO Jr., J. & OLIVEIRA, J.B. Parâmetros de solo para o cálculo da água disponível com base na textura do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.11, p.11-15, 1987.
- BAUER A., BLACK A. L. Organic carbon effects on available water capacity of three soil textural groups. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.56, p.248-254, 1992.
- BELL, M.; van KEULEN. Soil pedotransfer functions for four Mexican soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.59, p.865-878, 1995.
- BELL, M.; van KEULEN, Effect of soil disturbance on pedotransfer function development for field capacity. **Soil Technology**, v.8 p.321-329, 1996.
- BOUMA, J. Using soil survey data for quantitative land evaluation. **Advances in Soil Science, New York**, v. 9, p.177-213, 1989.
- BROOKS, R.H. & COREY, A.T. **Hydraulic properties of porous media**: Hydrology Papers, Colorado State University, 1964. 24p.
- CAMBARDELLA, C.A.; MOORMAN, T.B.; NOVAK, J.M.; PARKIN, T.B.; KARLEM, D.L.; TURCO, R.F.; KONOPA, A.E. Field scale variability of soil properties in central Iowa soil. **Soil Science Society of America Journal, Madison**, v.47, p.1501-1511, 1994.
- CASTILHOS, R.M.; MEURER, E.J.; KÄMPF, N.; PINTO, L.F.S. Mineralogia e fontes de potássio em solos no Rio Grande do Sul cultivados com arroz irrigado. **Revista Brasileira de Ciência Solo**, Viçosa (MG), v.26, p. 579-587. 2002.
- COELHO, E.F.; CONCEIÇÃO, M.A.F. & SOUZA, V.A.B. Estimativa dos limites de disponibilidade de água em função da densidade global e da textura do solo. **Revista Ceres**, 45:183-192, 1998.
- CORNELIS, W. M., J. RONSYN, M. Van MEIRVENNE, AND R. HARTMANN. Evaluation of pedotransfer functions for predicting the soil moisture retention curve. **Soil Science Society of America Journal, Madison**, v.65, p.638–648, 2001.
- DIJKERMAN, J. C. An Ustult-Aquult-Tropept Catena in Sierra Leone, West Africa, II. Land Qualities and Land. **Geoderma, Amsterdam**, v.42 p. 29-49, 1988.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGOPECUÁRIA – EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 2ª ed. Rio de Janeiro, 1997. 212 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro, Embrapa Solos, Brasília, 2006. 306p.

GAISER, T., GRAEF, F., CORDEIRO, J. C. Water retention characteristics of soils with contrasting clay mineral composition in semi-arid tropical regions. **Australian Journal of Soil Research** v.38, p.523–536, 2000.

GAMMA DESIGN SOFTWARE. GS+: Geostatistics for the Environmental Sciences. Plainwell: **Gamma Design Software**, 2004. CD-ROM.

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

HOODNETT, M. G.; TOMASELLA, J. Marked differences between van Genuchten soil water-retention parameters for temperate and tropical soils: a new waterretention pedotransfer function developed for tropical soils. **Geoderma, Amsterdam**, v. 108, p. 155 – 180, 2002.

HILLEL, D., **Fundamentals of soil physics**. New York, Academic Press, 1980. 413 p.

JOURNEL, A.G.; HUIJBREGTS, CH. J. **Mining geoestatics**. New York: Academic Press Inc., 1978. 600p.

LAL, R. Physical properties and moisture retention characteristics of some Nigerian soils. **Geoderma**, v.21, p. 209-223, 1979.

MCBRATNEY, A.B., MINASNY, B., CATTLE, S.R., VERVOORT, R.W. From pedotransfer functions to soil inference systems. **Geoderma** v.109, p.41–73, 2002.

OLIVEIRA L. B.; RIBEIRO M. R.; JACOMINE P. K. T.; RODRIGUES, J. V. V.; MARQUES, F. A. Funções de Pedotransferência para predição da umidade retida a potenciais específicos em solos do Estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, p. 315-323, 2002.

PACHEPSKY, Y. A.; RAWLS, W. J. Accuracy and reliability of pedotransfer functions as affected by grouping soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, WI, v.63, p.1748-1756, 1999.

PIDGEON, J. D. The measurement and prediction of available water capacity of Ferrallitic soils in Uganda. **Soil Science Journal**, v.23, p.431-44, 1972.

PRINGLE, M. J.; ROMANO, N.; MINASNY, B.; CHIRICO, G. B.; LARK, R. M. Spatial evaluation of pedotransfer functions using wavelet analysis . **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 333, p.182– 198, 2007.

RAWLS, W.J., D.L. BRAKENSIEK,; K.E. SAXTON. Estimation of soil water properties. **Trans. American Society of Agronomy**, v.25, p.1316–1320. 1982.

RAWLS, W.J.;BRAKENSIEK, D.L. Estimation of soil water retention and hydraulic properties, in: H.J.Morel-Seytoux (ed.) **Unsaturated Flow in Hydrologic Modeling-Theory and Practice**, NATO ASI Series, Kluwer Academic. Dordrecht, v.9, 1989, p.275-300.

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

REICHARDT, K.; TIMM, L.C. **Solo, Planta e Atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. São Paulo: Editora Manole, 2004. 478p.

ROMANO, N., SANTINI, A. Effectiveness of using pedo-transfer functions to quantify the spatial variability of soil water retention characteristics. **Journal of Hydrology, Amsterdam**, v.202, p.137–157, 1997.

SOLANO, P. J. E. **Retenção de água e pedofunções para solos do Rio Grande do Sul**. 2003, 117f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo)- Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

TEDESCO, M.J., GIANELLO, C., BISSANI, C.A., BOHNEN, H. & VOLKWEISS, S.J. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2a ed. revisada e ampliada. Porto Alegre: Faculdade de Agronomia. UFRGS, 1995. 174p. (Boletim Técnico, 5).

TESSIER, D., BIGORRE, F. AND BRUAND, A., La capacité d'échange: outil de prévision des propriétés physiques des sols. **C.R. Acad. Agric. Fr.**, v.85, p.37–46, 1999.

TOMASELLA, J., M. G. HODNETT, L. ROSSATO. Pedotransfer functions for the estimation of soil water retention in Brazilian soils. **Soil Science Society of America Journal, Madison**, v.64, p.327–338, 2000.

TOMASELLA, J.; HOODNETT, M. G.. Pedotransfer functions for tropical soils. In: **Development of pedotransfer functions in soil hydrology**. Y. A. Pachepsky & W. J. Rawls (Eds). Elsevier, Amsterdam. 2004. p.415-430.

URACH, F. L. **Estimativa da retenção de água em solos para fins de irrigação**. 2007, 78f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo)- Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

Van den BERG, M.; KLAMT, E.; van REEUWIJK, L. P.; Sombroek, W. G. Pedotransfer functions for the estimation of moisture retention characteristics of Ferralsols and related soils. **Geoderma, Amsterdam**, v.78, p.161-180, 1997.

Van GENUCHTEN, M.Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.44, p.892-897, 1980.

VEREECKEN, H.; FEYEN, J.; MAES, J. Estimating the soil moisture retention characteristic from texture, bulk density and carbon content. **Soil Science** v.148, p.389–403, 1989.

VEREECKEN, H. Estimating the unsaturated hydraulic conductivity from theoretical models using simple soil properties. **Geoderma**, v.65, p. 81-92, 1995.

VIEIRA, S.R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H. & SCHAEFER, C.E.G.R. (Eds.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.1. 2000, p.1-54.

WÖSTEN, J. H. M.; PACHEPSKY, Y. A., RAWLS, W.J. Pedotransfer functions: bridging gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. **Journal of Hydrology, Amsterdam**, v. 251, p. 123-150, 2001.

7 CAPÍTULO 2

FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA PONTUAIS VOLUMÉTRICAS E VARIABILIDADE ESPACIAL DA RETENÇÃO DE ÁGUA EM SOLOS DE VÁRZEA

7.1 Introdução

Os conteúdos de água retidos no solo sob determinada tensão são de larga utilização em projetos de irrigação e drenagem, sendo utilizados tanto no dimensionamento como na avaliação destes sistemas, além de serem necessários para o equacionamento de muitos problemas relacionados ao manejo do solo e da água sob o enfoque agrícola ou ambiental. A curva de retenção de água no solo (CRA), que estabelece a relação entre o conteúdo de água e a tensão, é característica para cada tipo de solo e depende de criteriosa amostragem do solo, equipamentos sofisticados em laboratório, técnicos treinados e, assim, demanda considerável tempo para sua execução e possui custo elevado. Alternativamente é possível estimar os pontos da CRA através de outros atributos do solo mais simples de serem obtidos e disponíveis em bancos de dados de solos. Neste sentido, Bouma (1989) introduziu o conceito de Função de Pedotransferência (FPT) que está relacionado à estimativa de atributos mais difíceis de ser determinado, como o conteúdo de água no solo sob uma determinada tensão, a partir de atributos facilmente determinados e/ou obtidos em análises de laboratório como frações granulométricas, carbono orgânico, entre outros.

Diversas FPTs foram desenvolvidas para estimar o conteúdo de água volumétrico no solo sob as tensões de 10kPa e 33kPa, que são relacionadas ao

conceito de Capacidade de Campo (CC), e 1500kPa, tensão relacionada ao Ponto de Murcha Permanente (PMP) (HILLEL, 1980; REICHARDT & TIMM, 2004).

Aina & Periaswamy (1985) analisaram 12 perfis de solos da região oeste da Nigéria, em amostras coletadas até a profundidade de 0,42m. As FPTs foram elaboradas para as tensões de 33 e 1500kPa em amostras indeformadas e em amostras peneiradas, respectivamente.

Van den Berg et al. (1997) utilizaram 91 amostras de solos a partir de 31 perfis para gerar FPTs por regressão linear múltipla para $\theta_{10\text{kPa}}$ e $\theta_{1500\text{kPa}}$. Os perfis usados para o desenvolvimento das FPTs foram obtidos em solos do Brasil, China, Colômbia, Gabão, Indonésia, Costa do Marfim, Quênia, Malásia, Zâmbia e Moçambique, sendo que aproximadamente 75% dos solos foram classificados como Latossolos.

Gaiser et al. (2000) desenvolveram FPTs para $\theta_{33\text{kPa}}$ e $\theta_{1500\text{kPa}}$ utilizando um banco de dados de solos com 627 amostras de regiões do nordeste do Brasil (Ceará e Piauí) e sul da Nigéria, tendo como característica comum o desenvolvimento sob condições tropicais semi-áridas e origem de rochas sedimentares com predomínio de arenitos.

Tomasella et al. (2003) desenvolveram FPTs para as tensões de 10, 33 e 1500kPa a partir de um extenso banco de dados de solos compreendendo 838 amostras de todas as regiões do Brasil, com predomínio de amostras de solos da região sudeste.

Rawls et al. (1982) trabalharam com 2.543 amostras de solos coletadas em todas as regiões dos Estados Unidos. As FPTs foram desenvolvidas por regressão linear múltipla para 12 pontos da curva de retenção, da tensão de 4kPa até 1.500kPa, utilizando como variáveis explanatórias os teores de argila, silte, areia, matéria orgânica, a densidade do solo e as umidades volumétricas nas tensões de 33 e 1.500kPa.

Giarola et al. (2002) trabalharam com 35 amostras dos horizontes A e B de 18 perfis de solos coletados nos estados de Santa Catarina (5 perfis) e do Rio Grande do Sul (13 perfis), entre os quais dois perfis são de solos hidromórficos. As FPTs desenvolvidas para $\theta_{1500\text{kPa}}$ foram separadas por horizonte (A e B) e para $\theta_{33\text{kPa}}$ os horizontes foram agrupados.

Urach (2007) desenvolveu dois conjuntos de FPTs, trabalhando com dois bancos de dados de solos distintos, o primeiro denominado de Irriga, com solos mais

argilosos da região central do RS, e o segundo denominado de “Literatura”, com banco de dados de solos selecionados em diversas publicações pesquisadas, englobando maior diversidade de solos. As FPTs para o conjunto de dados de solos do sistema Irriga, foram desenvolvidas a partir de 253 dados de retenção de água, sendo 45% dos solos classificados como muito argiloso. Para o conjunto de FPTs desenvolvidas a partir do banco de dados de solos denominado “Literatura”, foram utilizados 624 dados de retenção de água, dos quais 58,8% estão nas classes texturais entre franco-argiloso e muito argiloso e 17% na classe franco.

Recentemente, uma área que vem despertando o interesse de pesquisadores é a que envolve as FPTs e a variabilidade espacial dos atributos hídricos do solo. Neste sentido, alguns trabalhos têm investigado a possibilidade das FPTs em capturar a estrutura de dependência espacial da variável estimada e quais técnicas devem ser desenvolvidas ou incorporadas nas FPTs para tal finalidade (ROMANO e SANTINI, 1997; SINOWSKI, 1997; ROMANO, 2004; HERBST, 2006).

Das FPTs citadas anteriormente, nenhuma foi validada em solos com características semelhantes aos solos de várzea existentes no Rio Grande do Sul. Conseqüentemente, existe a necessidade de testar FPTs desenvolvidas para solos de regiões tropicais ou temperadas, quando aplicadas a uma série de dados de solo de várzea.

Assim, o objetivo deste trabalho foi testar a aplicabilidade e o desempenho de sete FPTs pontuais desenvolvidas em distintas regiões, para estimar o conteúdo volumétrico de água no solo nas tensões de 10, 33 e 1500kPa, e sua capacidade de descrever a estrutura de dependência espacial da variável estimada, a partir de um conjunto de dados coletados em um solo de várzea do Rio Grande do Sul, por meio de indicadores estatísticos e ferramentas geoestatísticas.

7.2 Material e métodos

Em uma área de 1,0ha situada no município do Capão do Leão, ao sul do Rio Grande do Sul, nas coordenadas 52°28'00"W e 31°49'21"S, foi demarcada uma malha experimental com pontos espaçados de 10m x 10m, totalizando 100 pontos amostrais (Fig. 9). O solo da área é classificado em duas classes taxonômicas, nas partes relativamente altas Planossolo Háplico eutrófico gleissólico e nas partes relativamente baixas Gleissolo Háplico eutrófico solódico (EMBRAPA, 2006),

apresentando relevo plano, desenvolvido a partir de sedimentos recentes originados de rochas graníticas. São solos imperfeitamente a mal drenados e compõem, juntamente com outros grupos de solos, os solos de várzea do Rio Grande do Sul. A área foi cultivada nas últimas três safras agrícolas com as culturas do arroz irrigado (dois anos) e sorgo granífero (um ano), ambas no sistema convencional. O clima na região, conforme classificação de Köppen, é o Cfa, sendo o local representativo de um ambiente subtropical, marítimo, de verão subúmido e o resto do ano úmido ou superúmido.

Em cada ponto da malha foram coletadas amostras de solo com estrutura preservada utilizando-se anel volumétrico de 0,05m de diâmetro e 0,03m de altura na profundidade inicial de 0,075m para determinação da curva de retenção de água no solo (tensões de 0, 1, 6, 10, 33, 100 e 1500kPa), densidade do solo e porosidade total do solo (EMBRAPA, 1997).

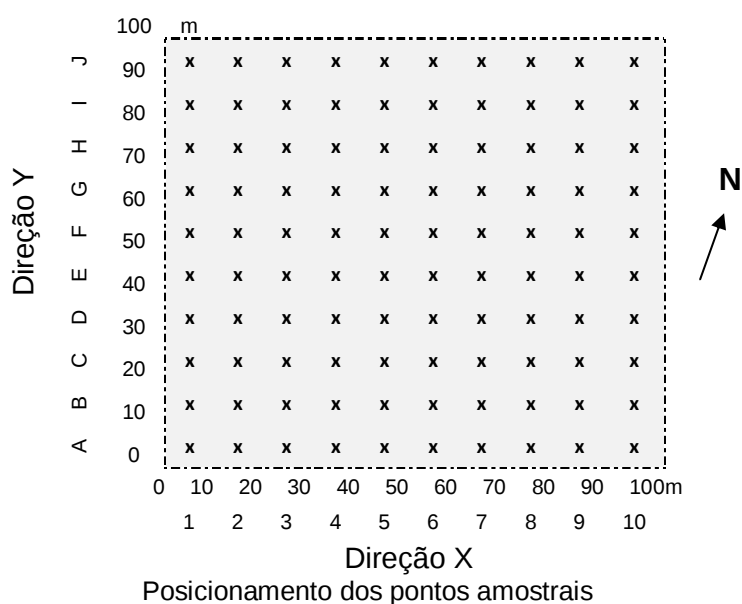


Figura 9 - Ilustração da malha experimental com os 100 pontos.

Na camada de 0 – 0,20m foram coletadas amostras deformadas para determinação da granulometria (frações areia, silte e argila) seguindo o método da pipeta descrito em Gee e Bauder (1986), utilizando hidróxido de sódio 1N como agente dispersante. O teor de carbono orgânico (Co) foi determinado pelo método Walkley-Black conforme Tedesco et al. (1995), sendo que a matéria orgânica (Mo) foi obtida multiplicando-se o teor de carbono orgânico por 1,724.

Foram selecionadas sete FPTs pontuais (tab. 5 e 6) desenvolvidas para estimar os conteúdos volumétricos de água nas tensões de 10, 33 e 1500kPa, em solos de regiões tropicais (AINA & PERIASWAMY, 1985; Van den BERG et al., 1997; GAISER et al., 2000; TOMASELLA et al., 2003), temperadas (RAWLS et al., 1982), e regionais, como as de Giarola et al. (2002) para solos dos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, e Urach (2007) para solos do Rio Grande do Sul.

No trabalho de Tomasella et al. (2003), para a tensão de 33kPa, é utilizada a variável explanatória umidade equivalente (Me), que corresponde ao conteúdo de água gravimétrico remanescente em uma amostra de solo deformada, após centrifugação a 2.400rpm por 30min. Desta forma, é esperado alta correlação entre os valores estimados e medidos de θ_{33kPa} . Embora os autores tenham citado que a medida de Me conste freqüentemente em levantamentos de campo, este atributo não é medido em praticamente nenhum levantamento de solo ou rotina de laboratórios no sul do Brasil. Assim, pelas razões descritas, a FPT desenvolvida por Tomasella et al. para θ_{33kPa} não foi avaliada neste estudo.

As faixas de variação dos dados de solos utilizados para a calibração das FPTs avaliadas foram comparadas com os dados do solo de várzea deste estudo para verificar se estes se ajustavam dentro das faixas. A tab. 7 mostra esta análise e, embora alguns valores dos atributos do solo da série de dados deste estudo estivessem fora destas faixas, a avaliação das FPTs foi conduzida utilizando toda a série de dados do solo de várzea estudado.

Os indicadores estatísticos utilizados para avaliar o desempenho das FPTs foram o erro médio (ME, equação 5), a raiz quadrada do erro médio ao quadrado (RMSE, equação 6) e o coeficiente de determinação r^2 .

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (e_i - m_i) \quad (5)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (e_i - m_i)^2} \quad (6)$$

onde: n = número de pontos amostrais (100); e_i = valor estimado da variável resposta pela FPT e m_i = valor medido da variável. O ME é um indicador da exatidão da estimativa, revelando a tendência da FPT de superestimar os valores se positivo ou de subestimar se negativo, enquanto que o RMSE quantifica a dispersão dos valores medidos e estimados em torno da linha 1:1. Os valores estimados pelas

FPTs e os medidos de cada variável também foram plotados em gráficos 1:1 para uma inspeção visual do desempenho das mesmas.

A partir dos resultados destes indicadores as FPTs foram classificadas conforme o menor valor absoluto de ME e de RMSE e o maior valor de r^2 . Foram atribuídos valores de 1 (melhor desempenho) a 8 (pior desempenho) para cada índice por FPT e a soma dos valores de cada índice foi utilizada como critério para selecionar a FPT com melhor desempenho (CORNELIS et al., 2001). Após esta etapa foi atribuída a classificação 1 (clas.1) para a FPT que apresentasse o menor valor desta soma e a classificação 8 (clas. 8) para a que apresentasse o maior valor. No caso de somas iguais foi atribuída a menor clas. a FPT que apresentasse o melhor desempenho quanto ao ME.

Para avaliar a capacidade de cada FPT de descrever a estrutura de dependência espacial da variável resposta foi aplicada a análise geoestatística (JOURNEL & HUIJBREGTS, 1978; VIEIRA, 2000) que tem no semivariograma a ferramenta chave para quantificar a dependência espacial entre os dados. No presente estudo os semivariogramas experimentais foram ajustados ao modelo matemático esférico (JOURNEL & HUIJBREGTS, 1978) no intuito de facilitar a avaliação do desempenho de cada FPT em descrever a estrutura de variabilidade.

Durante a análise geoestatística foram ajustados somente modelos isotrópicos, considerando que a variação espacial é igual em todos os sentidos. Para analisar o grau de dependência espacial da variável, utilizou-se a classificação proposta por Cambardella et al. (1994) a qual considera o grau de dependência espacial forte quando a relação $C0/(C0+C) \leq 25\%$, moderado quando a relação $25 < C0/(C0+C) \leq 75\%$ e fraco quando a relação $C0/(C0+C) > 75\%$. A técnica de validação cruzada foi utilizada para verificar a qualidade de ajuste do modelo esférico ao semivariograma experimental, sendo os seus resultados avaliados por meio do coeficiente de determinação (r^2) da regressão entre os valores estimados e os medidos e pelo coeficiente de regressão (CR), que expressa o quanto se aproxima a reta de regressão da linha 1:1. A análise exploratória dos conjuntos de dados (estatística descritiva) e a análise geoestatística foram executadas por meio dos softwares Minitab-14, (MINITAB.14, 2003) e GS+ versão 7 (GAMMA DESIGN SOFTWARE, 2004).

Tabela 5 – Funções de Pedotransferência pontuais para a umidade volumétrica do solo nas tensões de 10kPa (θ_{10kPa}), 33kPa (θ_{33kPa}) e 1500kPa ($\theta_{1500kPa}$) e regiões geográficas originárias dos solos utilizados.

Autor	Função de Pedotransferência	Região geográfica
Rawls et al. (1982)	$\theta_{10kPa} = 0.4118 - 0.0030 \text{ areia} + 0.0023 \text{ argila} + 0.0317 \text{ Mo}$ $\theta_{33kPa} = 0.2576 - 0.0020 \text{ areia} + 0.0036 \text{ argila} + 0.0299 \text{ Mo}$ $\theta_{1500kPa} = 0.026 + 0.005 \text{ argila} + 0.0158 \text{ Mo}$	Solos dos Estados Unidos da América
Aina & Periaswamy (1985)* ¹	$\theta_{33kPa} = 0,6788 - 0,0055 \text{ areia} - 0,0013 (\text{Ds} \cdot \text{areia})$ $\theta_{1500kPa} = 0,0213 + 0,0031 \text{ argila}$	Solos da Nigéria
Van den Berg et al. (1997)* ¹	$\theta_{10kPa} = 0.1088 + 0,00347 \text{ argila} + 0,00211 \text{ silte} + 0,01756 \text{ Co}$ $\theta_{1500kPa} = 0,0389 + 0,00258 (\text{silte} + \text{argila})$	Latossolos (América do Sul, África e sudeste da Ásia).
Gaiser et al. (2000)* ^{1*2}	$\theta_{33kPa} = 0,000115 \text{ Co} + 0,00620 \text{ argila} + 0,00264 \text{ silte}$ $\theta_{1500kPa} = 0,00372 \text{ argila} + 0,00083 \text{ silte}$	Região sul da Nigéria e nordeste do Brasil (Ceará e Piauí).
Giarola et al. (2002)	$\theta_{33kPa} = 0,081 + 0,005 \text{ silte} + 0,004 \text{ argila}$ $\theta_{1500kPa} = -0,031 + 0,005 \text{ silte} + 0,003 \text{ argila}$	Solos do Rio Grande do Sul e Santa Catarina.
Tomasella et al. (2003)	$\theta_{10kPa} = 0,339255 + 0,112526 Z_{10}$ $\theta_{33kPa} = 0,28951 + 0,103815 Z_{11}$ $\theta_{1500kPa} = 0,214008 + 0,0862945 Z_{13}$	Solos do Brasil, abrangendo as cinco regiões do país.
Urach / Irriga (2007)	$\theta_{10kPa} = 0,40971 - 0,00268 \text{ areia} - 0,00123 \text{ silte} + 0,00084 \text{ Ds}$ $\theta_{33kPa} = 0,34086 - 0,00225 \text{ areia} + 0,00055 \text{ argila} + 0,03737 \text{ Ds}$ $\theta_{1500kPa} = 0,11238 + 0,00087 \text{ argila} + 0,08496 \text{ Ds}$	Solos do Rio Grande do Sul, provenientes do banco de dados de solos do Sistema Irriga-SM.
Urach / Literatura (2007)* ¹	$\theta_{10kPa} = 0,496557 - 0,001688 \text{ areia} + 0,0021658 \text{ argila} - 0,126897 \text{ Ds}$ $\theta_{33kPa} = 0,542628 - 0,0022029 \text{ areia} - 0,121324 \text{ Ds}$ $\theta_{1500kPa} = 0,298999 - 0,00156 \text{ areia} + 0,00187 \text{ argila} - 0,06759 \text{ Ds}$	Solos do Rio Grande do Sul, provenientes de banco de dados diversos.

*¹ θ na FPT original em porcentagem; *² Co na FPT original em g.kg^{-1} ; θ_{10} , 33 e 1500kPa = conteúdo volumétrico de água no solo ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$) nas tensões de 10, 33 e 1500kPa; argila, silte e areia = teor de argila, silte e de areia no solo (%); Mo= teor de matéria orgânica no solo (%); Co = carbono orgânico no solo (%); Ds = densidade do solo (Mg.m^{-3}); Z_{10} , Z_{11} e Z_{13} = parâmetros da FPT conforme tab. 2.

Tabela 6 – Equações dos parâmetros das FPTs de Tomasella et al. (2003).

$$X_{14} = -1,05501 + 0,0650857 \text{ silte}$$

$$X_{15} = -2,07588 + 0,0423954 \text{ argila}$$

$$X_{16} = -6,03402 + 4,80572 \text{ Ds}$$

$$X_{17} = -2,18409 + 8,84963 \text{ Me}$$

$$Z_9 = 0,175202 + 1,18513 X_{17} - 0,0996042 - (X_{17})^2 + 0,327915 X_{16} - 0,0758657 (X_{16})^2$$

$$Z_{10} = 0,929344 Z_9 + 0,132519 X_{14}$$

$$Z_{11} = 0,191452 + 1,25652 X_{17} - 0,079098(X_{17})^2 + 0,393814X_{16} + 0,152095X_{17}X_{16}$$

$$Z_{13} = 0,235084 + 0,33033 X_{15} - 0,191838 (X_{15})^2 + 0,0543679 (X_{15})^3 + 0,977685 X_{17} + \\ 0,304174 X_{15} X_{17} - 0,218857 (X_{17})^2 - 0,164373 X_{15} (X_{17})^2 + 0,0415057 (X_{17})^3 + \\ 0,373361 X_{16} + 0,0811861 X_{17} X_{16} - 0,0768087 X_{15} X_{17} X_{16}$$

silte, argila = teor de silte e teor de argila no solo (%); Ds = densidade do solo (Mg.m^{-3}); Me = umidade equivalente (%).

Tabela 7 – Faixa de magnitude (mínimos e máximos) dos atributos do solo utilizados na calibração das FPTs.

FPT (autores)	argila	silte	areia	Co	Ds
		----- % -----			Mg.m^{-3}
Solo de teste	11,6-18,1 (14,3)	33,3-48,3 (39,8)	38,5-54,0 (45,8)	1,0-1,5 (1,2)	1,36-1,75 (1,60)
Rawls et al. (1982)	1-93 (18)	1-93 (26)	1-99 (56)	0-4,0	0,74-1,74 (1,42)
Aina & Periaswamy (1985)	8-43	6-20	42-86	nd	0,85-1,68
van den Berg et al.(1997)	10-95	nd	nd	0,1-5,2	0,8-1,6
Gaiser et al. (2000)	0,2-58	0-54	nd	0,01-4,8	nd
Giarola et al. (2002)	6,0-81,0 (42,59)	9,9-41,80 (22,6)	nd (34,8)	0,3-3,9 (1,3)	0,85-1,76 (1,28)
Tomasella et al. (2003)	1,7-96,0	0-71,0	nd	0-6,39	0,72-1,91
Urach – Irriga (2007)	11,1-86,7 (55,9)	4,2-67,6 (19,5)	1,2-72,7 (26,0)	nd	1,01-1,63 (1,34)
Urach – Literatura (2007)	1,9-76,6 (35,2)	2,1-78,0 (29,5)	3,7-95,8 (35,2)	0,06-5,6	0,86-1,85 (1,44)

Co = carbono orgânico no solo; Ds = densidade do solo; nd = dado não disponível; valores entre parênteses = valores médios.

7.3 Resultados e discussão

A análise exploratória dos valores medidos do conteúdo volumétrico de água nas tensões de 10kPa, 33kPa e 1500kPa e estimados pelas FPTs (tab. 8) permite verificar a proximidade dos valores da média e da mediana para todos os valores medidos e estimados pelas FPTs, indicando uma centralidade da distribuição dos dados.

Para as estimativas de θ_{10kPa} , a magnitude do desvio padrão e do coeficiente de variação (CV) foram sensivelmente menores em todas as FPTs em relação aos valores medidos de θ_{10kPa} , com exceção da FPT de Tomasella et al., na qual esta diminuição na magnitude dos valores foi menos acentuada. Esta diminuição na magnitude dos valores do desvio padrão e do CV é um fato esperado já que os modelos ajustados tendem a suavizar o comportamento dos valores estimados de θ nas diferentes tensões. Este comportamento também ficou evidenciado na amplitude de variação dos dados estimados de θ_{10kPa} pelas FPTs. Resultados com a mesma tendência foram encontrados por Romano & Santini (1997) que testaram duas funções de pedotransferência pontuais e duas paramétricas.

Os coeficientes de assimetria dos conjuntos estimados de θ_{10kPa} não tiveram um comportamento definido em termos de magnitude, com alguns valores maiores e outros menores em relação aos dados medidos, entretanto mantiveram a classificação como assimétrica negativa, com exceção da FPT de Tomasella et al. que apresentou assimetria positiva. Com relação ao coeficiente de curtose as FPTs apresentaram diminuição da magnitude deste coeficiente em relação ao valor do coeficiente para os dados medidos, e alteraram a classificação passando de leptocúrtica para o conjunto de dados medidos a platicúrticas para os dados estimados de θ_{10kPa} .

Na tensão de 33kPa, os valores estimados pelas FPTs para o desvio padrão e o coeficiente de variação apresentaram magnitudes destes valores menores do que as magnitudes para o valor de θ_{33kPa} medido, com exceção da FPT de Aina & Periaswamy que apresentou uma magnitude destes valores maior. Os coeficientes de assimetria dos conjuntos estimados de θ_{33kPa} diminuíram em termos de magnitude em relação ao valor para θ_{33kPa} medido, e apresentaram uma tendência geral de alterar a classificação de assimétrica positiva para negativa, com exceção

da FPT de Urach / Literatura que apresentou valor positivo mas muito próximo de zero. Com relação ao coeficiente de curtose todas as FPTs apresentaram aumento na magnitude deste coeficiente em relação ao valor do coeficiente para os dados medidos, e alteraram a classificação passando de leptocúrtica para o conjunto de dados medidos a platicúrticas para o conjunto de dados estimados de 033kPa.

Pode-se ainda analisar (tab. 8), os resultados da estatística descritiva dos valores medidos de 01500kPa e estimados pelas FPTs.

Os coeficientes de assimetria não apresentaram tendência definida em termos de alterar a classificação da assimetria. Apenas as FPTs de Tomasella et al. e Urach / Irriga apresentaram magnitude de valores de assimetria maior do que o conjunto de dados medidos de 01500kPa e também foram as únicas FPTs que alteraram a distribuição dos dados passando de classificação platicúrtica para leptocúrtica em relação aos dados medidos.

De uma maneira geral, para os conjuntos de dados medidos e estimados pelas FPTs, nas três tensões avaliadas, as magnitudes dos valores da média foram bastante próximas das encontradas para a mediana mostrando a tendência de que os dados seguem uma distribuição normal. Os valores do coeficiente de normalidade calculados pelo teste de Kolmogorov-Smirnov (K-S) foram inferiores ao valor crítico (0,121 para $\alpha=10\%$), exceto para a FPT de Gaiser et al., para a tensão de 1500kPa.

O CV aumenta conforme aumenta a tensão com que a água esta retida no solo como pode ser observado na tab. 8, onde os valores do CV foram de 7,60%, 8,60% e 20,50% para os conjuntos de dados medidos de 010kPa, 033kPa e 01500kPa, respectivamente. Este comportamento é bastante citado na literatura (ROMANO & SANTINI, 1997; TIMM et al., 2006; CHIRICO et al., 2007). Embora os valores dos CVs para os conjuntos de dados estimados pelas FPTs tenham apresentado valores menores em relação aos dados medidos, devido ao efeito de suavização proporcionado pela modelagem, o comportamento em relação às diferentes tensões foi semelhante, apresentando valores médios de CV igual a 4,8%, 5,7% e 6,2% para os conjuntos de dados estimados de 010kPa, 033kPa e 01500kPa, respectivamente.

Tabela 8 – Estatística descritiva dos valores de $\theta_{10\text{kPa}}$, $\theta_{33\text{kPa}}$ e $\theta_{1500\text{kPa}}$ ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$) medidos e estimados pelas FPTs.

Origem dos dados	Média	Mediana	Desv Pad	Mínimo	Máximo	CV	Assim	Curtose	K-S
$\theta_{10\text{kPa}}$									
Medidos	0,312	0,313	0,024	0,249	0,394	7,60	-0,11	1,19	0,09
Rawls et al., 1982	0,374	0,375	0,017	0,338	0,407	4,50	-0,12	-0,58	0,06
van den Berg et al, 1997	0,264	0,265	0,010	0,242	0,283	3,80	-0,22	-0,60	0,06
Tomasella et al., 2003	0,331	0,332	0,022	0,280	0,384	6,78	0,12	-0,30	0,06
Urach, 2007 - Irriga	0,239	0,240	0,006	0,225	0,251	2,64	-0,37	-0,52	0,06
Urach, 2007 - Literatura	0,247	0,248	0,015	0,215	0,276	5,99	-0,07	-0,61	0,05
$\theta_{33\text{kPa}}$									
Medidos	0,279	0,277	0,024	0,230	0,354	8,60	0,46	0,03	0,08
Rawls et al., 1982	0,280	0,282	0,014	0,249	0,310	5,04	-0,16	-0,50	0,07
Aina & Periaswamy, 1985	0,331	0,333	0,031	0,261	0,391	9,21	-0,23	-0,65	0,07
Gaiser et al, 2000	0,208	0,209	0,014	0,177	0,234	6,48	-0,35	-0,47	0,06
Giarola et al., 2002	0,338	0,338	0,018	0,298	0,375	5,33	-0,13	-0,68	0,07
Tomasella et al., 2003	0,273	0,272	0,022	0,227	0,340	8,15	0,40	-0,07	0,07
Urach, 2007 - Irriga	0,306	0,305	0,008	0,289	0,321	2,57	-0,19	-0,68	0,07
Urach, 2007 - Literatura	0,248	0,248	0,015	0,216	0,276	5,89	0,01	-0,70	0,07
$\theta_{1500\text{kPa}}$									
Medidos	0,187	0,184	0,038	0,115	0,292	20,59	0,38	-0,40	0,07
Rawls et al., 1982	0,131	0,131	0,007	0,116	0,151	5,92	0,03	-0,07	0,06
Aina & Periaswamy, 1985	0,066	0,066	0,004	0,057	0,078	6,22	0,08	-0,16	0,05
van den Berg et al, 1997	0,179	0,179	0,010	0,157	0,198	5,37	-0,20	-0,67	0,06
Gaiser et al, 2000	0,086	0,087	0,006	0,073	0,099	6,91	-0,35	-0,21	0,12
Giarola et al., 2002	0,211	0,211	0,017	0,173	0,250	8,26	-0,06	-0,67	0,05
Tomasella et al., 2003	0,147	0,147	0,012	0,124	0,187	7,96	0,53	0,75	0,06
Urach, 2007 - Irriga	0,261	0,262	0,006	0,241	0,272	2,29	-0,55	0,55	0,09
Urach, 2007 - Literatura	0,146	0,146	0,011	0,123	0,165	7,22	-0,23	-0,66	0,07

Desv Pad = desvio padrão ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$); CV = coeficiente de variação (%); Assim = coeficiente de assimetria; Curtose = coeficiente de curtose; K-S = valor da estatística referente ao teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov (valor crítico = 0,121 para $\alpha = 10\%$).

A tab. 9 apresenta a análise do desempenho das FPTs testadas para estimar os conteúdos volumétricos de água no solo nas tensões de 10kPa, 33kPa e 1500kPa, utilizando os indicadores estatísticos ME, RMSE e r^2 bem como a classificação de cada FPT baseado na metodologia proposta. Nesta tabela verifica-se, pelo sinal de ME, que as FPTs de van den Berg et al., Urach / Irriga e de Urach / Literatura subestimaram os valores de θ_{10kPa} em 0,048, 0,073 e 0,065cm³.cm⁻³, respectivamente, enquanto que, contrariamente, para as FPTs de Tomasella et al. e de Rawls et al. superestimaram estes valores em 0,019 e 0,062cm³.cm⁻³, respectivamente.

Tabela 9 – Indicadores estatísticos erro médio (ME), raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE), coeficiente de determinação (r^2) e classificação das FPTs avaliadas nas tensões de 10, 33 e 1500kPa.

FPTs	----- θ_{10kPa} -----				----- θ_{33kPa} -----				----- $\theta_{1500kPa}$ -----			
	ME	RMSE	r^2	clas.	ME	RMSE	r^2	clas.	ME	RMSE	r^2	clas.
Rawls et al.	0,062	0,064	40,2	2	0,001	0,021	20,2	1	-0,056	0,067	9,8	4
Aina & Periaswamy	ne	ne	ne	ne	0,053	0,059	24,9	3	-0,121	0,127	6,0	8
van den Berg et al.	-0,048	0,052	13,8	3	ne	ne	ne	ne	-0,008	0,036	16,9	1
Gaiser et al.	ne	ne	ne	ne	-0,071	0,074	21,3	6	-0,101	0,107	13,6	6
Giarola et al.	ne	ne	ne	ne	0,059	0,063	26,5	4	0,024	0,043	16,1	2
Tomasella et al.	0,019	0,022	79,6	1	na	na	na	na	-0,039	0,052	21,7	3
Urach - Irriga	-0,073	0,075	38,1	5	0,027	0,034	24,7	2	0,074	0,083	0,8	7
Urach - Literatura	-0,065	0,067	36,5	4	-0,031	0,038	15,7	5	-0,041	0,055	0,7	5

ME (cm³.cm⁻³); RMSE (cm³.cm⁻³) e r^2 (%); ne = não estimado pelo autor; na = não avaliado.

Entre as FPTs avaliadas, a FPT de Urach / Irriga apresentou o maior valor (em magnitude) de ME para θ_{10kPa} medido. O valor máximo estimado para θ_{10kPa} pela FPT de Urach / Irriga (tab. 8) foi praticamente igual ao valor mínimo para o conjunto de dados medidos, indicando um ajuste baixo da FPT de Urach / Irriga.

Analisando a FPT de Urach / Irriga (tab. 5) pode-se observar que as variáveis explanatórias areia e silte, respondem por uma diminuição no valor de θ_{10kPa} , a partir do intercepto (0,40971cm³.cm⁻³), de 0,00268 e 0,00123cm³.cm⁻³ respectivamente, para cada aumento em 1% nos valores de areia e silte. Na tab. 7 são apresentadas as amplitudes de cada variável explanatória para o conjunto de dados medidos e para cada um dos conjuntos de dados das FPTs, onde se pode

observar que os dados de areia e silte utilizados para a FPT de Urach / Irriga apresentam valores médios de 26,0% e 19,5% respectivamente, enquanto os valores destas variáveis para o solo em estudo são de 45,8% e 39,8%, apresentando ainda uma amplitude de variação menor do que os dados usados para a FPT de Urach / Irriga. Esta diferença é suficiente para explicar, apenas com os valores médios, uma diminuição no valor estimado de θ_{10kPa} de aproximadamente $0,078\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$, não considerando a variação atribuída a densidade do solo que é no sentido de acréscimo, porém de baixa magnitude.

A FPT de Urach / Literatura apresentou um comportamento semelhante ao da FPT de Urach / Irriga subestimando os valores de θ_{10kPa} em relação aos valores medidos. As variáveis explanatórias utilizadas foram os teores de areia e argila e a densidade do solo (tab. 5). Pelo mesmo motivo descrito anteriormente, a variável areia exerce relativa influencia na diminuição do valor de θ_{10kPa} , assim como a variável argila em função da menor faixa de amplitude e do menor teor médio nos dados do solo em estudo. Em adição ao efeito de subestimar os valores de θ_{10kPa} , na FPT de Urach / Literatura, a determinação dos teores de umidade no solo nesta tensão foi executada a partir de um conjunto de amostras com estrutura preservada e outras com estrutura não preservada, o que pode estar diminuindo a expressão do efeito da estrutura sobre a retenção de água nestas amostras.

A FPT de Rawls et al. apresentou o maior valor superestimado de ME para θ_{10kPa} , o que pode estar relacionado a maior amplitude das variáveis areia e argila no conjunto de dados usados na calibração da FPT em relação ao solo testado neste estudo.

Van den Berg et al. utilizaram em seu conjunto de dados de calibração amostras dos horizontes A, AB ou BA e B, de solos predominantemente latossólicos, os quais permitiram uma ampla faixa de variação dos teores de argila (tab. 5) e alta correlação com θ_{10kPa} . No solo deste estudo a correlação dos teores de argila com θ_{10kPa} foi baixa, provavelmente em função da pequena amplitude dos teores de argila e da diferença na mineralogia da argila entre os dois conjuntos de solos, e estas devem ser as causas para a FPT ter subestimado os valores de θ_{10kPa} . Oliveira et al. (2002) relatam que as funções de pedotransferência tendem a ser tão mais acuradas quanto mais homogêneos forem os solos que compõem a base de dados e quão mais singulares a estes estiverem os que terão seus dados estimados.

A FPT de Tomasella et al. apresentou o menor valor de ME para θ_{10kPa} (tab. 9). Os autores utilizaram como variáveis explanatórias a umidade equivalente (Me), teores de silte e densidade do solo, as quais são altamente correlacionadas com θ_{10kPa} (0,84, 0,60 e -0,44, respectivamente) no solo testado. A presença da variável Me, que corresponde a umidade gravimétrica na tensão de 33kPa, muito provavelmente está influenciando a melhor estimativa de θ_{10kPa} .

Os valores de RMSE, calculados a partir do desempenho das FPTs em relação ao erro médio de predição, apresentam valores proporcionais ao ME para constituição da classificação, e serão discutidos na sequência deste trabalho, quando da apresentação dos gráficos de dispersão entre os valores medidos e estimados.

O maior coeficiente de determinação (r^2) foi obtido pela FPT de Tomasella et al. (79,6%), o que associado com o menor valor de ME fez com que esta FPT tenha apresentado o melhor desempenho (clas.=1).

A FPT de Urach / Irriga foi a que apresentou o mais fraco desempenho considerando todos os coeficientes de avaliação (clas.=5).

De uma maneira geral, com exceção da FPT de Tomasella et al., as FPTs avaliadas para θ_{10kPa} apresentaram fraco desempenho.

Para o conteúdo de água na tensão de 33kPa as FPTs de Aina & Periaswamy, Giarola et al. e de Urach / Irriga superestimaram os valores de θ_{33kPa} , com valores positivos de ME (0,053, 0,059 e 0,027cm³.cm⁻³, respectivamente), enquanto as FPTs de Gaiser et al. e de Urach / Literatura subestimaram os valores de θ_{33kPa} , com valores negativos de ME (0,071 e 0,027cm³.cm⁻³, respectivamente).

A FPT de Gaiser et al. apresentou o maior valor absoluto de ME, o que pode estar relacionado a diferente mineralogia da argila nos solos de validação da FPT, e ao fato de ter utilizado amostras deformadas para determinação de θ_{33kPa} , não incorporando o efeito da estrutura na retenção de água nesta tensão.

Embora a FPT de Urach / Literatura tenha subestimado os valores de θ_{33kPa} , o valor da média estimada é maior do que o valor estimado para a média de θ_{10kPa} (tab. 8). Este efeito, adicionalmente ao que foi anteriormente discutido para θ_{10kPa} , deve estar relacionado a composição do banco de dados utilizados na calibração, no qual 58,8% dos solos são classificados entre as classes franco-argiloso e muito argiloso.

Comportamento similar é observado para a FPT de Urach / Irriga, que superestima os valores de θ_{33kPa} , com valor médio estimado maior do que o valor médio estimado para θ_{10kPa} . A respeito da FPT de Urach / Irriga subestimar os valores de θ_{10kPa} já foi discutido anteriormente, e aqui, soma-se o efeito desta FPT em superestimar os valores de θ_{33kPa} . Esta superestimativa dos valores de θ_{33kPa} , de forma idêntica ao já comentado, deve-se à diferença nos teores médios de argila entre os solos de calibração da FPT de Urach / Irriga e do solo deste estudo, 55,9% e 14,3% (tab. 7), respectivamente. Afora as diferenças entre amplitude de variação destes teores, outro fator que pode estar atuando, e tem efeito aditivo a este, é o fato de o conjunto de dados da FPT de Urach / Irriga ter sido composto com amostras de três camadas de solo, até 0,60m de profundidade, o que pode estar influenciando as características de retenção de água nesta tensão para os dois conjuntos de dados. Neste sentido, alguns pesquisadores têm alertado para a importância da validação de FPTs quando aplicadas para solos com características diferentes dos solos de origem das FPTs (SCHAAP & LEIJ, 1998; MAYR e JARVIS, 1999; OLIVEIRA et al., 2002; BUDIMAN et al., 2003).

A FPT de Aina & Periaswamy estima os valores de θ_{33kPa} a partir das variáveis explanatórias areia e densidade do solo. Na tab. 7 observa-se que a faixa de variação dos teores de areia nos solos de calibração da FPT de Aina & Periaswamy é deslocada para valores maiores do que os valores do solo testado. Esta deve ser a principal razão desta FPT superestimar os valores de θ_{33kPa} .

A FPT de Giarola et al. foi a que apresentou o maior valor positivo de ME ($0,059\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$). Giarola et al. utilizaram os teores de silte e argila no solo para estimar θ_{33kPa} , a partir de amostras dos horizontes A e B, sendo que aproximadamente 46% destas amostras apresentam teores de argila maior do que 50%. Para os solos de Giarola et al. o teor de argila explicou 66% da variação de θ_{33kPa} enquanto no conjunto de dados do solo do presente estudo o teor de argila apresenta coeficiente de determinação com θ_{33kPa} de apenas 3,1%. Outros fatores relevantes são o material de origem e o tipo de argila presente em cada banco de dados dos solos, pois, diferentemente do solo deste estudo, formado a partir de material originário de sedimentos de rochas graníticas, 28% dos solos de calibração da FPT de Giarola et al. são originários de rochas basálticas sendo a maioria classificados em argissolos, chernossolos, latossolos e podzólicos. Estas devem ser as razões do baixo desempenho da FPT de Giarola et al. para θ_{33kPa} .

A FPT de Rawls et al. apresentou o menor valor de ME para o conjunto de dados de $\theta_{33\text{kPa}}$ ($0,001\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$), apresentando o valor estimado médio para $\theta_{33\text{kPa}}$ praticamente igual ao valor da média do conjunto de dados medidos. A presença conjunta das variáveis areia e matéria orgânica pode ser a causa do bom desempenho desta FPT, pois estas duas variáveis apresentam coeficiente de determinação de 26,0% e 10,2%, respectivamente, com $\theta_{33\text{kPa}}$, além de o banco de dados dos solos de Rawls et al. apresentar a maior amplitude em todas as variáveis explanatórias.

O melhor desempenho entre as FPTs avaliadas para estimar $\theta_{33\text{kPa}}$ foi obtido pela FPT de Rawls et al. (clas.=1) mas com baixa capacidade de predição (com coeficiente de determinação r^2 igual a 20,2%). O desempenho mais fraco foi encontrado para a FPT de Gaiser et al. (clas.=6), que apresentou o maior valor para o coeficiente ME ($-0,071\text{ cm}^3.\text{cm}^{-3}$) e coeficiente $r^2 = 21,3\%$. O melhor coeficiente de determinação foi obtido pela FPT de Giarola et al. ($r^2 = 26,5\%$).

Ainda da tab. 8 pode-se analisar o desempenho das FPTs em relação a $\theta_{1500\text{kPa}}$. Nesta tabela verifica-se que as FPTs de Aina & Periaswamy e de Gaiser et al. apresentam os maiores valores de ME ambas subestimando os valores de $\theta_{1500\text{kPa}}$ em $0,121$ e $0,101\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$, respectivamente.

A FPT de Aina & Periaswamy estima o valor de $\theta_{1500\text{kPa}}$ utilizando o teor de argila como única variável explanatória. Nos dados dos solos utilizados para calibração da FPT de Aina & Periaswamy, a faixa de variação do teor de argila foi de 8,0 a 43,0% (tab. 7), coeficiente de correlação com $\theta_{1500\text{kPa}}$ de 0,96 (significativo a 1%), e coeficiente de determinação r^2 igual a 0,93 (AINA & PERIASWAMY, 1985). Nos dados do solo do presente estudo a faixa de variação do teor de argila foi de 11,6 a 18,1%, coeficiente de correlação de 0,24 (significativo a 5%) e coeficiente de determinação r^2 de 0,059, logo, para o conjunto de dados do solo no presente estudo, por regressão e na faixa de variação do teor de argila só é possível explicar 25% da variação nos valores de $\theta_{1500\text{kPa}}$. Afora os aspectos estatísticos, no trabalho de Aina & Periaswamy as determinações de $\theta_{1500\text{kPa}}$ foram realizadas com amostras não preservadas oriundas de sete camadas de 0,06m a 0,42m, o que pode estar refletindo diferenças na mineralogia da argila dos dados de calibração da FPT de Aina & Periaswamy e do solo de teste. Ainda com relação às diferenças de solos, a faixa de variação do teor de silte nos solos de calibração da FPT de Aina &

Periaswamy (6-20% - tab. 7) é completamente fora da faixa de variação do silte no solo testado (33,3-48,3%).

A FPT de Gaiser et al. para $\theta_{1500\text{kPa}}$ utiliza como variáveis explanatórias os teores de argila e silte as quais apresentaram amplas faixas de variação nos solos de calibração, enquanto no presente estudo estas faixas foram estreitas. Outra forte diferença refere-se aos solos utilizados na FPT de Gaiser et al., desenvolvidos em ambiente tropical, tipicamente semi-árido, em contraste aos solos hidromórficos do presente estudo.

O melhor desempenho em termos do valor de ME nas FPTs para $\theta_{1500\text{kPa}}$ foi obtido pela FPT de van den Berg et al., a qual utiliza as variáveis explanatórias teor de silte e de argila somados. Para os solos deste estudo a melhor correlação com $\theta_{1500\text{kPa}}$ foi obtida pelo teor de areia ($-0,41$, $p\text{-valor} < 0,01$), e desta maneira, a soma dos teores de argila e silte também exibem semelhante correlação.

A FPT de Urach / Irriga superestimou os valores de $\theta_{1500\text{kPa}}$, ($\text{ME} = 0,074\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$), a ponto de o valor médio estimado para $\theta_{1500\text{kPa}}$ ter apresentado um valor maior que o estimado para $\theta_{10\text{kPa}}$ pela FPT. As variáveis teor de argila e densidade do solo (D_s) foram utilizadas como variáveis explanatórias para $\theta_{1500\text{kPa}}$ (tab. 5), sendo que a faixa de variação de D_s nos dados utilizados para calibração foi de $1,01\text{Mg}.\text{m}^{-3}$ a $1,63\text{Mg}.\text{m}^{-3}$, enquanto nos solos deste estudo a faixa de variação de D_s foi de $1,36\text{Mg}.\text{m}^{-3}$ a $1,75\text{Mg}.\text{m}^{-3}$. Uma análise nos dados do solo de teste mostrou que 38% dos valores de D_s são maiores que $1,63\text{Mg}.\text{m}^{-3}$, o que certamente contribui no sentido de superestimar os dados.

Na estimativa de $\theta_{1500\text{kPa}}$, os coeficientes de determinação r^2 foram baixos para todas as FPTs avaliadas.

A FPT de van den Berg et al. apresentou o melhor desempenho ($\text{clas.}=1$) em comparação com as demais FPTs avaliadas, considerando os índices e coeficientes utilizados neste trabalho, enquanto a FPT de Aina & Periaswamy apresentou o desempenho mais fraco ($\text{clas.}=8$).

Nas Figuras 10, 11 e 12 são apresentados os gráficos de dispersão entre os valores medidos e estimados pelas FPTs para $\theta_{10\text{kPa}}$, $\theta_{33\text{kPa}}$ e $\theta_{1500\text{kPa}}$, respectivamente.

Conforme pode ser visualizado na Fig. 10, apenas a FPT de Tomasella et al. (Fig. 10-c) apresenta um bom desempenho de estimativa ($\text{clas.}=1$), embora superestime os valores de $\theta_{10\text{kPa}}$ ($\text{ME} = 0,019\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$). Pode-se observar a

relativa proximidade da dispersão dos pontos em relação a linha 1:1, indicado pelo baixo valor de RMSE ($0,022\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$). Pode-se, contudo, comprovar o bom desempenho dos três indicadores utilizados (ME, RMSE e coeficiente de determinação r^2) quando interpretados conjuntamente com o objetivo de comparar e classificar FPTs em termos de melhor aplicabilidade. Na Fig. 10-d pode-se visualizar a localização e a dispersão dos pontos estimados pela FPT de Urach / Irriga que apresentou o mais fraco desempenho (clas.=5), subestimando os valores de $\theta_{10\text{kPa}}$.

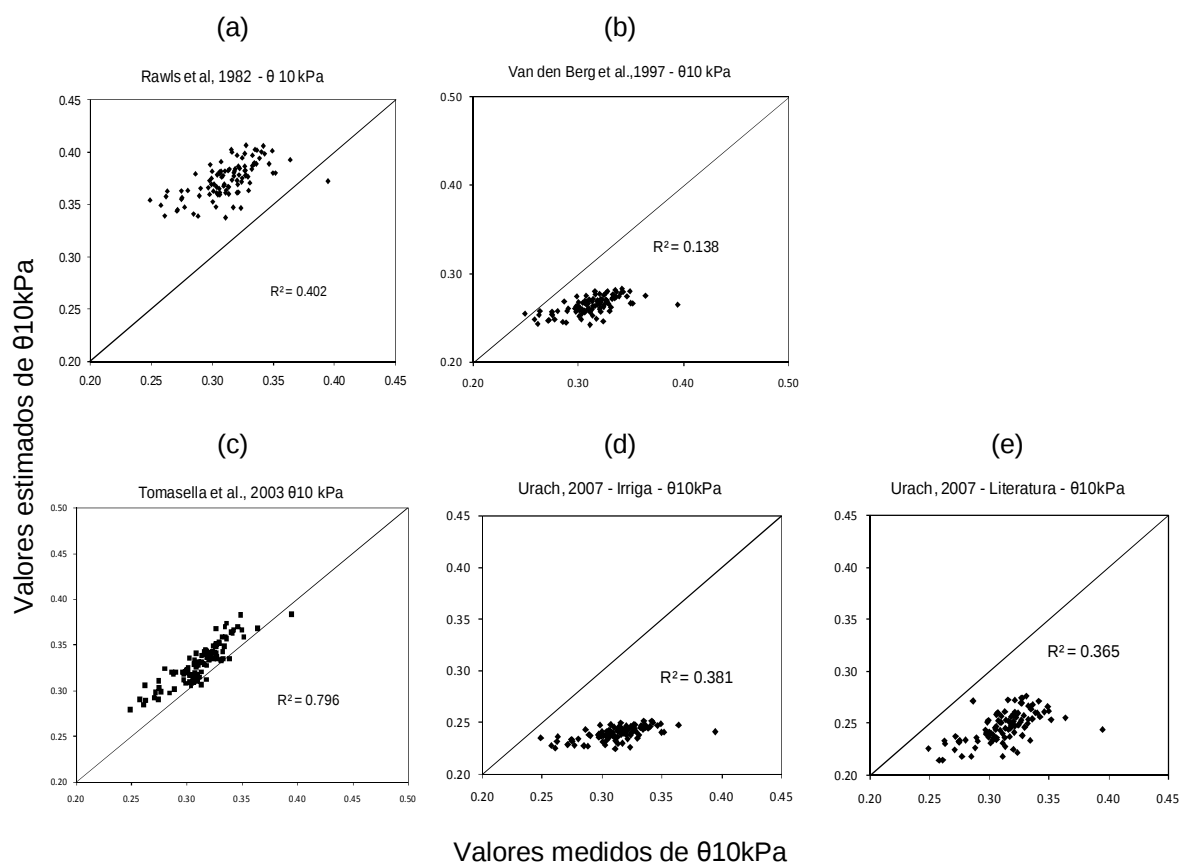


Figura 10 – Gráficos de dispersão com linha 1:1 dos valores medidos de $\theta_{10\text{kPa}}$ e estimados por (a) Rawls et al., 1982; (b) Van den Berg et al., 1997; (c) Tomasella et al., 2003; (d) Urach, 2007 / Irriga; (e) Urach, 2007 / Literatura.

Na Fig. 11 pode-se visualmente reconhecer o melhor desempenho da FPT de Rawls et al. (clas.=1), que embora tenha apresentado baixo valor de ME ($0,001\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$) e de RMSE ($0,021\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$), apresenta uma relativa dispersão dos pontos em relação a reta 1:1. O mais fraco desempenho para esta tensão foi

apresentado pela FPT de Gaiser et al. (tab. 9), com RMSE no valor de 0,074 $\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$, subestimando os valores de $\theta_{33\text{kPa}}$ e que fica evidenciado na Fig. 10-c.

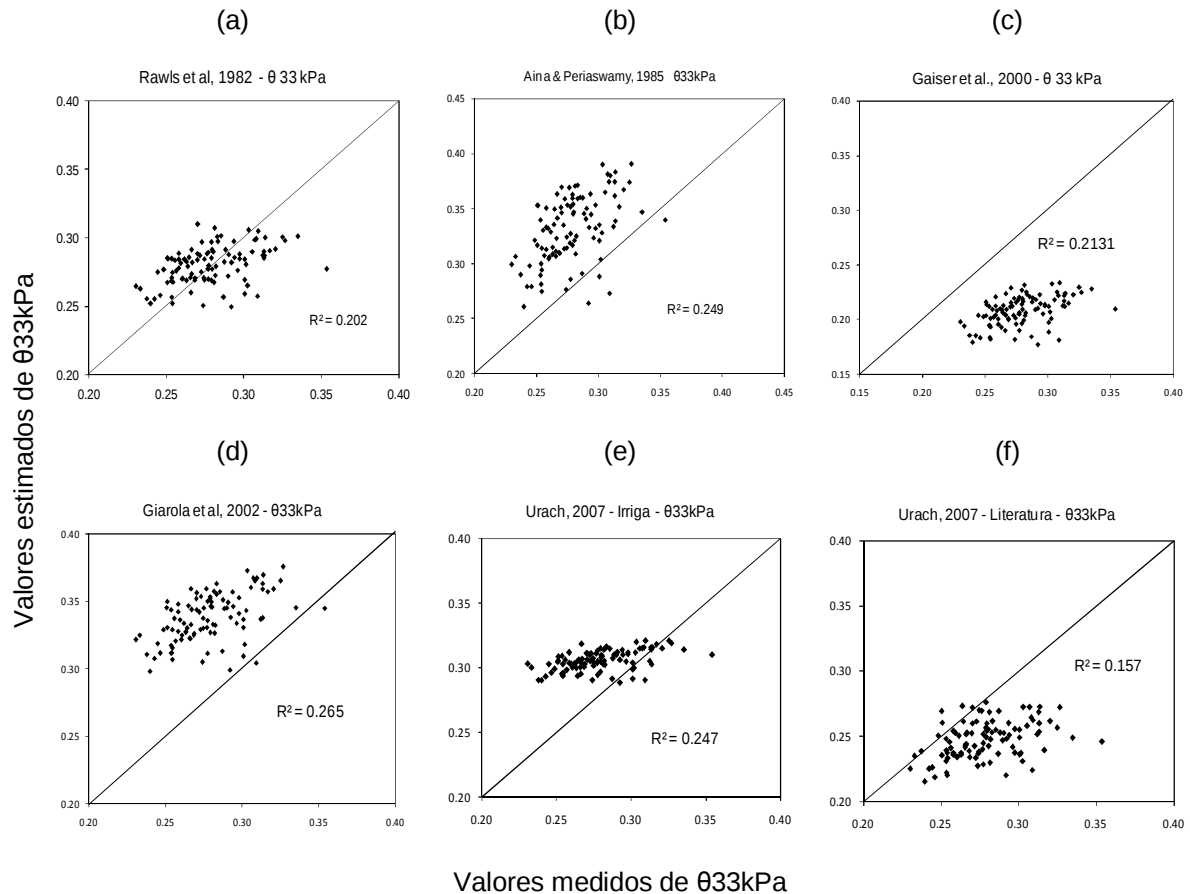


Figura 11 - Gráficos de dispersão com linha 1:1 dos valores medidos de $\theta_{33\text{kPa}}$ e estimados por (a) Rawls et al., 1982; (b) Aina & Periaswamy, 1985; (c) Gaiser et al., 2000; (d) Giarola et al., 2002; (e) Urach, 2007 / Irriga e (f) Urach, 2007 / Literatura.

Os gráficos de dispersão entre os valores medidos e estimados pelas FPTs para $\theta_{1500\text{kPa}}$ (Fig. 12) mostram que os melhores desempenhos avaliados pelos índices ME, RMSE e r^2 (tab. 9) foram das FPTs de van den Berg et al. e Giarolla et al., respectivamente. Entretanto, analisando os gráficos de dispersão para estas FPTs (fig. 12-c e 12-e, respectivamente) verifica-se que os pontos estão afastados da linha 1:1 e com grande dispersão. O único efeito que as diferencia das demais FPTs é que apresentam relativa simetria de distribuição dos pontos em relação a linha 1:1.

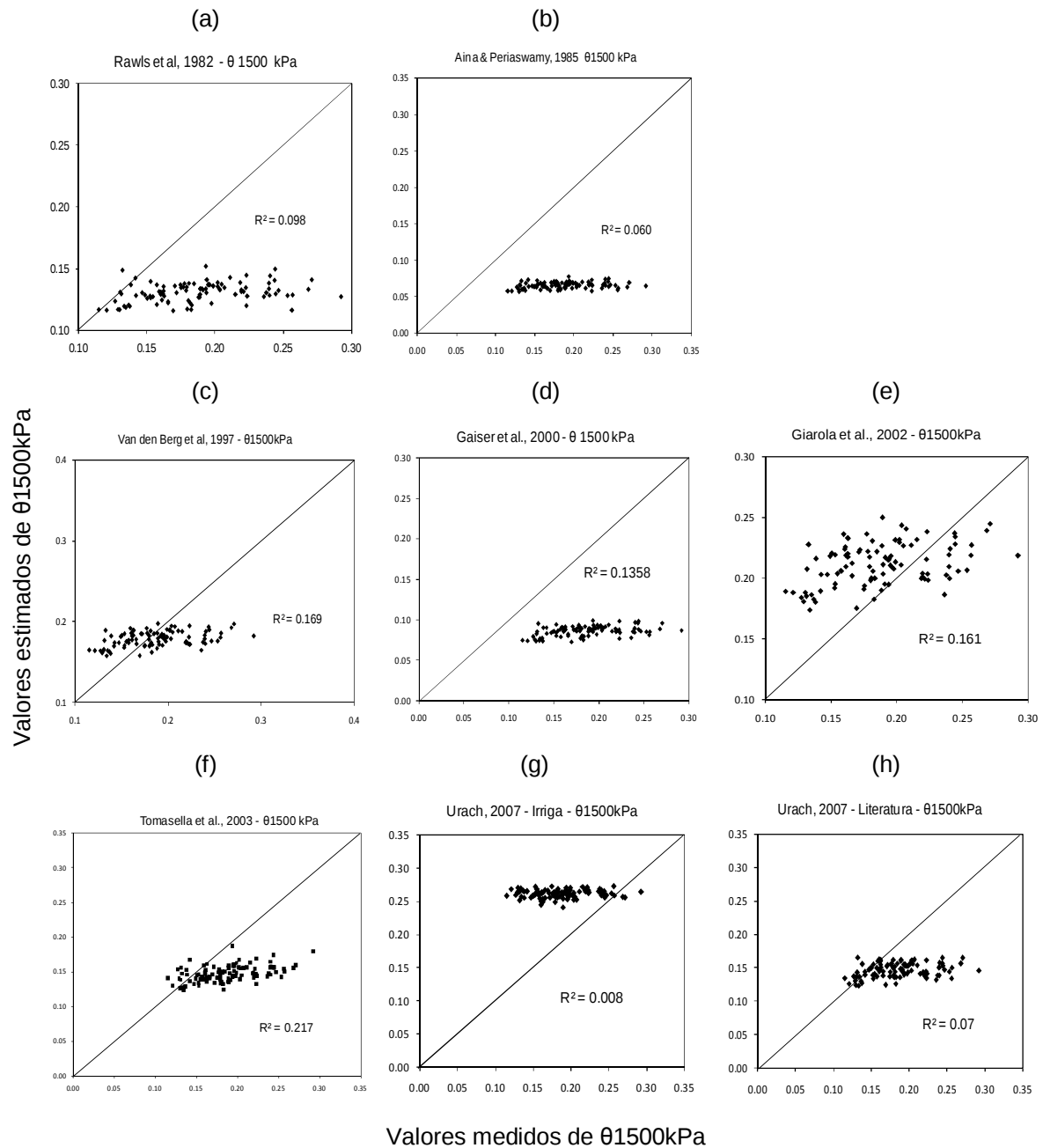


Figura 12 - Gráficos de dispersão com linha 1:1 dos valores medidos de θ 1500kPa e estimados por (a) Rawls et al, 1982; (b) Aina & Periaswamy, 1985; (c) Van den Berg et al., 1997; (d) Gaiser et al. 2000; (e) Giarola et al.,2002; (f) Tomasella et al., 2003; (g) Urach, 2007 – Irriga e (h) Urach, 2007 – Literatura.

Para testar a igualdade entre as médias estimadas pelas FPTs e a média dos valores medidos foi aplicado o teste t de student para cada conjunto de valores estimados pelas FPTs individualmente, em cada uma das variáveis analisadas (θ 10kPa, θ 33kPa e θ 1500kPa), comparativamente com o conjunto de valores medidos. Para atendimento das pressuposições do teste, dados normalmente

distribuídos e semelhança entre as variâncias, foi aplicado o teste F de Fischer para comparar as variâncias. A normalidade da distribuição dos dados já havia sido comprovada pelo coeficiente de Kolmogorov-Smirnov (tab. 8). No teste de igualdade de variâncias, todos os conjuntos de dados estimados pelas FPTs apresentaram valores de F maiores que o valor crítico para $F_{(100,100,0,05)}$ (1,415), com exceção da FPT de Tomasella et al. para $\theta 10\text{kPa}$. Os testes t, conduzidos sob a hipótese de homoscedasticidade ou heteroscedasticidade conforme o resultado do teste F, demonstraram que a hipótese de igualdade entre as médias deve ser rejeitada, i.e., cada um dos conjuntos de dados estimados pelas FPTs é diferente do conjunto de dados medidos, sob o ponto de vista estatístico.

7.3.1 Análise da variabilidade espacial

Os resultados da análise geoestatística são apresentados na tab. 10, na qual é mostrada a variância dos dados medidos de $\theta 10\text{kPa}$, $\theta 33\text{kPa}$ e $\theta 1500\text{kPa}$ e estimados pelas FPTs juntamente com os parâmetros do semivariograma teórico esférico (efeito pepita C_0 ; patamar C_0+C e alcance A) ajustado ao semivariograma experimental bem como o coeficiente de determinação r^2 do ajuste. Também é apresentado o Grau de Dependência Espacial (GDE, CAMBARDELLA et al., 1994) e os resultados do procedimento de validação cruzada (r^2 e coeficiente da regressão CR) que foi aplicado para verificar a qualidade do ajuste do semivariograma ajustado.

Analisando a tab. 10, observa-se que houve uma boa correspondência entre os valores da variância e do patamar (semivariância total), nas três tensões avaliadas, tanto para o conjunto de dados medidos como para os estimados pelas FPTs, o que, segundo Romano e Santini (1997) indica ausência de tendência nas séries de dados espaciais.

Para os dados de $\theta 10\text{kPa}$, os valores da distância de correlação espacial, expressa pelo alcance, encontrados pelas FPTs foram menores do que o valor encontrado para os dados medidos. A FPT de van den Berg et al. foi a que definiu o valor de alcance mais próximo ao valor do alcance para os dados medidos (31,6% menor). Todas as FPTs subestimaram o valor da semivariância total para $\theta 10\text{kPa}$ em relação ao valor para os dados medidos.

Tabela 10 – Parâmetros geoestatísticos e resultados da validação cruzada para os dados medidos de θ 10, θ 33 e θ 1500 kPa e estimados pelas FPTs.

FPT	Variância	Semivariância		Alcance (A)	r ^{2*}	GDE (%)	Validação cruzada	
		E. pepita (C0)	Patamar (C0+C)				r ²	CR
θ10kPa								
Medido	5,6x10 ⁻⁴	1,4x10 ⁻⁴	6,4x10 ⁻⁴	63,90	99,5	21,9	0,49	1,003
Rawls et al.	2,8x10 ⁻⁴	1,5x10 ⁻⁵	2,8x10 ⁻⁴	42,50	99,4	5,4	0,74	1,033
Van den Berg, et al.	1,0x10 ⁻⁴	4,0x10 ⁻⁶	1,0x10 ⁻⁴	43,70	98,8	4,0	0,79	1,037
Tomasella et al.	5,0x10 ⁻⁴	1,1x10 ⁻⁴	5,7x10 ⁻⁴	39,70	99,3	19,3	0,43	1,003
Urach - Irriga	4,0x10 ⁻⁵	1,4x10 ⁻⁶	3,8x10 ⁻⁵	40,10	98,8	3,7	0,76	1,024
Urach - Literatura	2,2x10 ⁻⁴	2,8x10 ⁻⁵	2,1x10 ⁻⁴	42,60	1,00	13,3	0,55	0,955
θ33kPa								
Medido	5,8x10 ⁻⁴	2,6x10 ⁻⁴	6,6x10 ⁻⁴	41,70	99,8	39,4	0,28	1,005
Rawls et al.	2,0x10 ⁻⁴	1,1x10 ⁻⁵	2,0x10 ⁻⁴	40,10	98,9	5,5	0,70	1,023
Aina & Periaswamy	9,3x10 ⁻⁴	3,3x10 ⁻⁵	9,3x10 ⁻⁴	42,70	98,2	3,5	0,81	1,037
Gaiser et al.	1,8x10 ⁻⁴	7,0x10 ⁻⁵	1,8x10 ⁻⁴	39,80	99,7	38,9	0,65	0,961
Giarola et al.	3,2x10 ⁻⁴	1,0x10 ⁻⁶	3,4x10 ⁻⁴	42,30	97,8	0,3	0,79	1,018
Urach - Irriga	6,2x10 ⁻⁵	1,2x10 ⁻⁶	6,4x10 ⁻⁵	38,40	98,4	1,9	0,65	0,962
Urach - Literatura	2,1x10 ⁻⁴	2,0x10 ⁻⁵	2,1x10 ⁻⁴	42,70	99,5	9,5	0,60	0,968
θ1500kPa								
Medido	1,5x10 ⁻³	1,1x10 ⁻⁴	1,6x10 ⁻³	25,10	98,1	6,9	0,29	0,771
Rawls et al.	6,0x10 ⁻⁵	1,0x10 ⁻⁶	4,9x10 ⁻⁵	21,40	41,4	2,0	0,28	0,718
Aina & Periaswamy	1,7x10 ⁻⁵	1,8x10 ⁻⁶	1,4x10 ⁻⁵	20,50	41,7	12,8	0,18	0,611
Van den Berg, et al.	9,2x10 ⁻⁵	3,4x10 ⁻⁶	9,5x10 ⁻⁵	42,20	97,8	3,6	0,80	1,034
Gaiser et al.	3,6x10 ⁻⁵	9,0x10 ⁻⁶	4,1x10 ⁻⁵	36,00	99,1	21,9	0,46	0,946
Giarola et al.	3,1x10 ⁻⁴	1,0x10 ⁻⁶	3,2x10 ⁻⁴	42,60	97,7	0,3	0,78	1,013
Tomasella et al.	1,4x10 ⁻⁴	5,1x10 ⁻⁵	1,5x10 ⁻⁴	37,80	99,3	34,0	0,26	0,932
Urach - Irriga	3,6x10 ⁻⁵	2,0x10 ⁻⁶	3,5x10 ⁻⁵	20,00	66,6	5,7	0,09	0,475
Urach - Literatura	1,1x10 ⁻⁴	1,1x10 ⁻⁵	1,0x10 ⁻⁴	42,80	99,9	11,0	0,65	0,994

E. pepita = efeito pepita; r^{2*} = coeficiente de ajuste do modelo; GDE = grau de dependência espacial $[(C_0/C_0+C) \times 100]$; r^2 = coeficiente de determinação da validação cruzada; CR = coeficiente de regressão entre os valores medidos e determinados durante o processo de validação cruzada.

A semivariância total, ou patamar, foi melhor estimada pela FPT de Tomasella et al., e fracamente estimada pela FPT de Urach / Irriga, as quais estimaram 89,0% e 6,0%, respectivamente, do valor calculado para os dados

medidos. Quanto aos valores calculados de GDE, tanto os valores medidos como os estimados pelas FPTs foram classificados como de forte dependência espacial ($GDE \leq 25\%$), com a FPT de Tomasella et al. tendo apresentado o valor de GDE mais próximo ao encontrado para os dados medidos.

Pode-se observar na tab. 10, com relação aos dados de $\theta 33kPa$, que as FPTs testadas tiveram um bom desempenho na estimativa do alcance, com os valores estimados variando entre 7,9% inferiores a 2,4% superiores ao valor calculado para os dados medidos. A FPT de Giarola et al. apresentou o melhor desempenho na estimativa do alcance (1,4% maior), enquanto o desempenho mais fraco foi obtido pela FPT de Urach / Irriga (7,9% menor). A semivariância total foi melhor estimada pela FPT de Aina & Periaswamy e fracamente estimada pela FPT de Urach / Irriga, as quais apresentaram valores 40,9% maior e 90,3% menor, respectivamente, do que o valor calculado para os dados medidos. Exceto a FPT de Gaiser et al., em que foi calculado um GDE moderado (29,0%), todos os demais foram classificados como de forte dependência espacial entre os dados.

Com relação aos dados medidos e estimados de $\theta 1500kPa$, observa-se na tab. 10 que as FPTs não tiveram um bom desempenho geral na estimativa do alcance. Os valores estimados pelas FPTs variaram entre valores 20,3% inferiores e 70,5% superiores ao valor do alcance calculado para os dados medidos de $\theta 1500kPa$. A melhor estimativa do alcance foi obtida pela FPT Rawls et al. (14,7% inferior) e a pior estimativa foi pela FPT de Urach / Literatura (70,5% superior). Todas as FPTs subestimaram o valor para a semivariância total. Com relação ao grau de dependência espacial todas as FPTs apresentaram forte GDE, concordando com os valores medidos, exceto a FPT de Tomasella et al. que apresentou moderado grau de dependência espacial.

Os resultados da validação cruzada (tab. 10) mostram que os semivariogramas ajustados apresentaram boa qualidade, para a maioria dos conjuntos de dados estimados pelas FPTs. Para os conjuntos de dados medidos, o ajuste ao modelo esférico apresentou baixos valores para o coeficiente de determinação da validação cruzada (r^2), embora com valores do coeficiente de regressão (CR) próximos de 1,0.

O desempenho mais fraco do ajuste ocorreu para os dados medidos de $\theta 1500kPa$ ($r^2 = 0,29$ e $CR = 0,771$), embora o ajuste ao modelo Gaussiano (auto

ajuste do programa GS+) não tenha proporcionado melhoria nestes coeficientes ($r^2 = 0,25$ e $CR = 0,63$).

Com relação aos semivariogramas ajustados aos conjuntos de dados estimados pelas FPTs para θ_{10kPa} , os valores do coeficiente de determinação r^2 foram relativamente altos, com valores acima de 0,55, exceto para a FPT de Tomasella et al. ($r^2 = 0,43$), enquanto os coeficientes de regressão foram todos próximos de 1,0, indicando que a reta de regressão entre os valores reais (estimados pelas FPTs) e estimados pela krigagem, foi bem ajustada a reta 1:1.

Para os valores estimados pelas FPTs para θ_{33kPa} , todos os semivariogramas ajustados apresentaram valores de r^2 maiores que 0,6 e coeficientes de regressão variando ao redor de 1,0, demonstrando a boa qualidade do ajuste dos semivariogramas. Para esta tensão, todas as FPTs tiveram um bom desempenho em relação a estimativa do alcance e da semivariância total (tab. 10).

Para estimativa de $\theta_{1500kPa}$, os dados das FPTs de van den Berg et al., Giarola et al. e Urach / Literatura obtiveram, pelo procedimento de validação cruzada, coeficientes r^2 de 0,80, 0,78 e 0,65, respectivamente, e coeficientes de regressão (CR) de 1,034, 1,013 e 0,994, respectivamente. Para as demais FPTs os coeficientes r^2 foram menores do que 0,50. A FPT de Urach / Irriga apresentou forte grau de dependência espacial ($GDE = 5,7\%$) e, entretanto, apresentou o menor valor de r^2 e de CR (0,09 e 0,475, respectivamente) na validação cruzada evidenciando a baixa qualidade do modelo ajustado. Comportamento semelhante foi identificado para as FPTs de Rawls et al. e Aina & Periaswamy, com forte dependência espacial e baixo desempenho dos semivariogramas ajustados. Para a FPT de Urach / Irriga, foram testados outros modelos para o semivariograma experimental, entretanto, os coeficientes da validação cruzada continuaram muito baixos.

As Figuras 13, 14 e 15 apresentam os semivariogramas isotrópicos experimentais e teóricos (modelo esférico) para os dados medidos de θ_{10kPa} , θ_{33kPa} e $\theta_{1500kPa}$ e estimados pelas FPTs testadas neste estudo, respectivamente.

Pode-se constatar (Fig.13-a) a baixa definição do patamar no semivariograma dos valores medidos de θ_{10kPa} quando comparada aos semivariogramas obtidos para as FPTs.

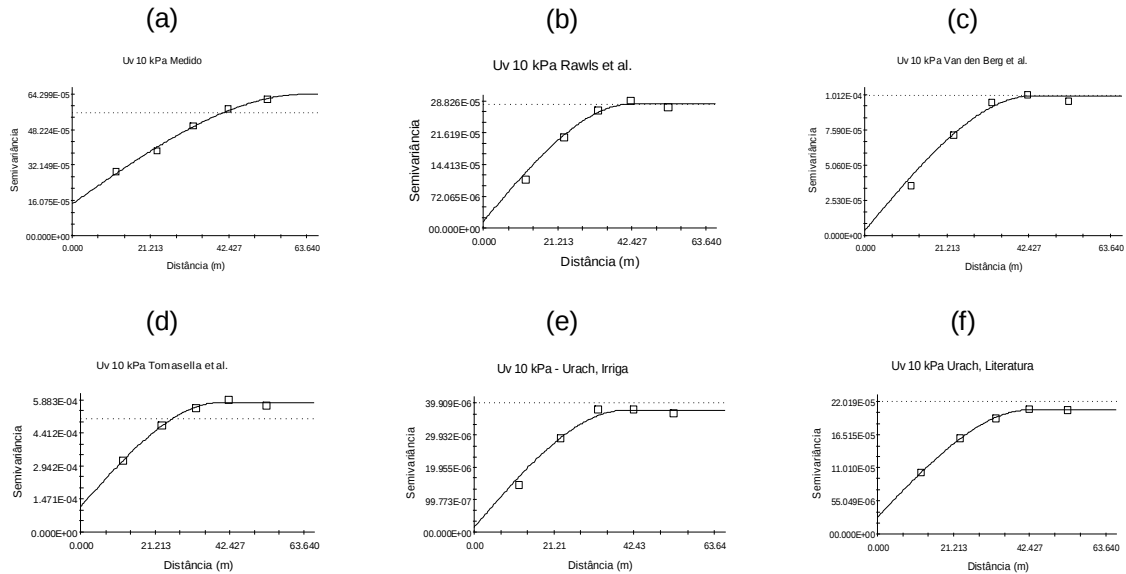


Figura 13 – Semivariogramas experimental e teórico para os valores de $\theta_{10\text{kPa}}$ (a) medido e estimado pelas FPTs de (b) Rawls et al., (c) van den Berg et al., (d) Tomasella et al., (e) Urach – Irriga e (f) Urach – Literatura.

Também é possível observar que há uma forte semelhança entre os semivariogramas obtidos por meio das FPTs de Rawls et al., van den Berg et al. e Urach / Literatura, tanto graficamente (Figuras 13-b, 13-c e 13-f) como nos parâmetros geoestatísticos ajustados (tab. 10), indicando que estas FPTs descrevem a estrutura de variabilidade espacial da variável estimada de forma semelhante, a partir de diferentes variáveis preditoras. Isto pode indicar que a variabilidade espacial de propriedades derivadas de outras propriedades básicas do solo não são necessariamente iguais (GOMES et al., 2007; FARKAS et al., 2008).

Analisando-se os semivariogramas isotrópicos experimentais e teóricos (modelo esférico) para os dados medidos de $\theta_{33\text{kPa}}$ e estimados pelas FPTs testadas neste estudo (Fig. 14) pode-se constatar que nenhuma das FPTs testadas conseguiu representar com boa qualidade o semivariograma experimental e o teórico dos valores medidos de $\theta_{33\text{kPa}}$.

Observa-se ainda, que as FPTs testadas para $\theta_{33\text{kPa}}$ tiveram o valor da semivariância total, ou patamar, coincidente com o valor da variância amostral, calculada pela estatística clássica, exceto para a FPT de Gaiser et al.

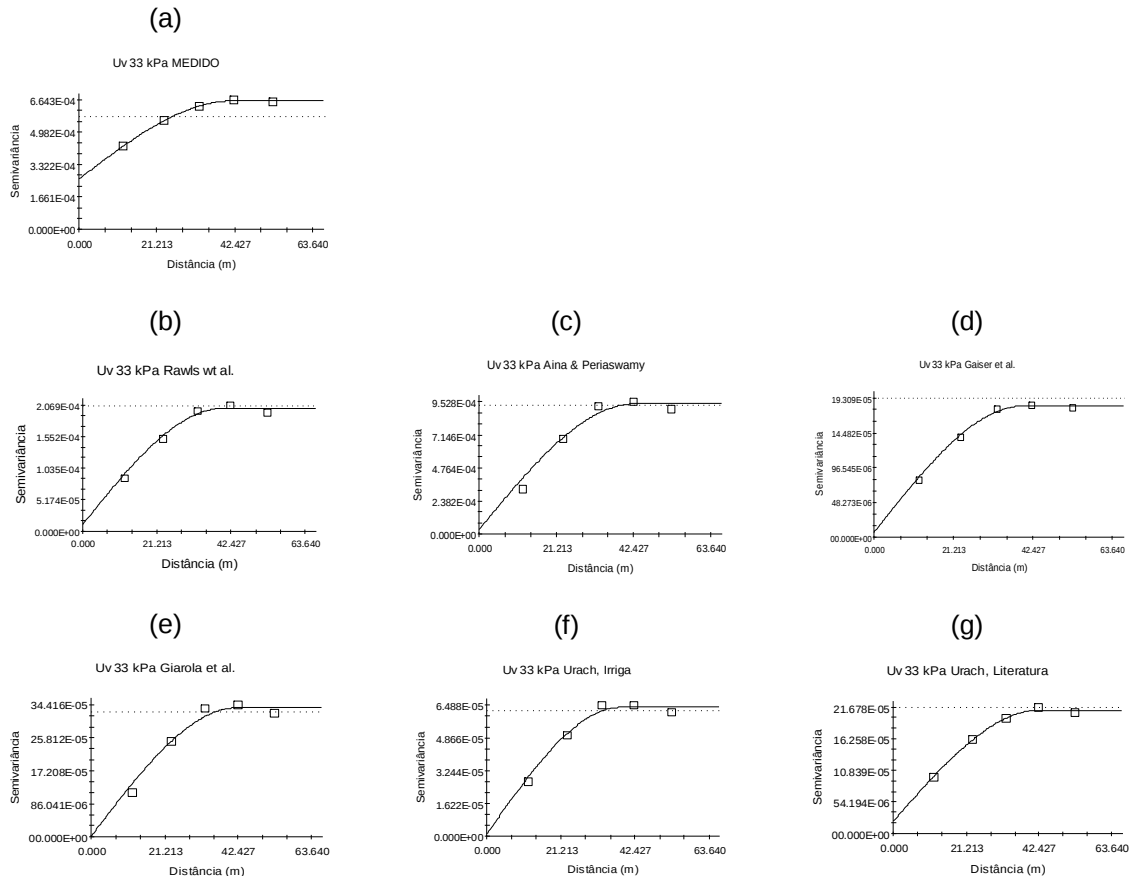


Figura 14 – Semivariogramas experimental e teórico para os valores de 033kPa (a) medido e estimado pelas FPTs de (b) Rawls et al., (c) Aina & Periaswamy, (d) Gaiser et al., (e) Giarola et al., (f) Urach – Irriga e (g) Urach – Literatura.

Os semivariogramas isotrópicos experimentais e teóricos (modelo esférico) construídos para os dados medidos de 01500kPa e para os estimados pelas FPTs testadas neste estudo (Fig.15) permitem constatar que nenhuma das FPTs testadas capturou o semivariograma experimental e o teórico dos valores medidos de 01500kPa.

Em termos de ajuste do semivariograma, pode-se visualmente comprovar a baixa qualidade dos semivariogramas teóricos ajustados para as FPTs de Rawls et al., Aina & Periaswamy e Urach / Irriga.

Os semivariograma teórico ajustado e o semivariograma experimental calculado para as FPTs de Rawls et al. e Aina & Periaswamy (Figuras 15-b e 15-c, respectivamente) não são coincidentes, enquanto que o semivariograma teórico ajustado para a FPT de Urach / Irriga possui apenas um ponto na região de dependência espacial, afora este ponto estar localizado próximo ao patamar. Estas

podem ser as razões dos baixos coeficientes da validação cruzada para estes semivariogramas.

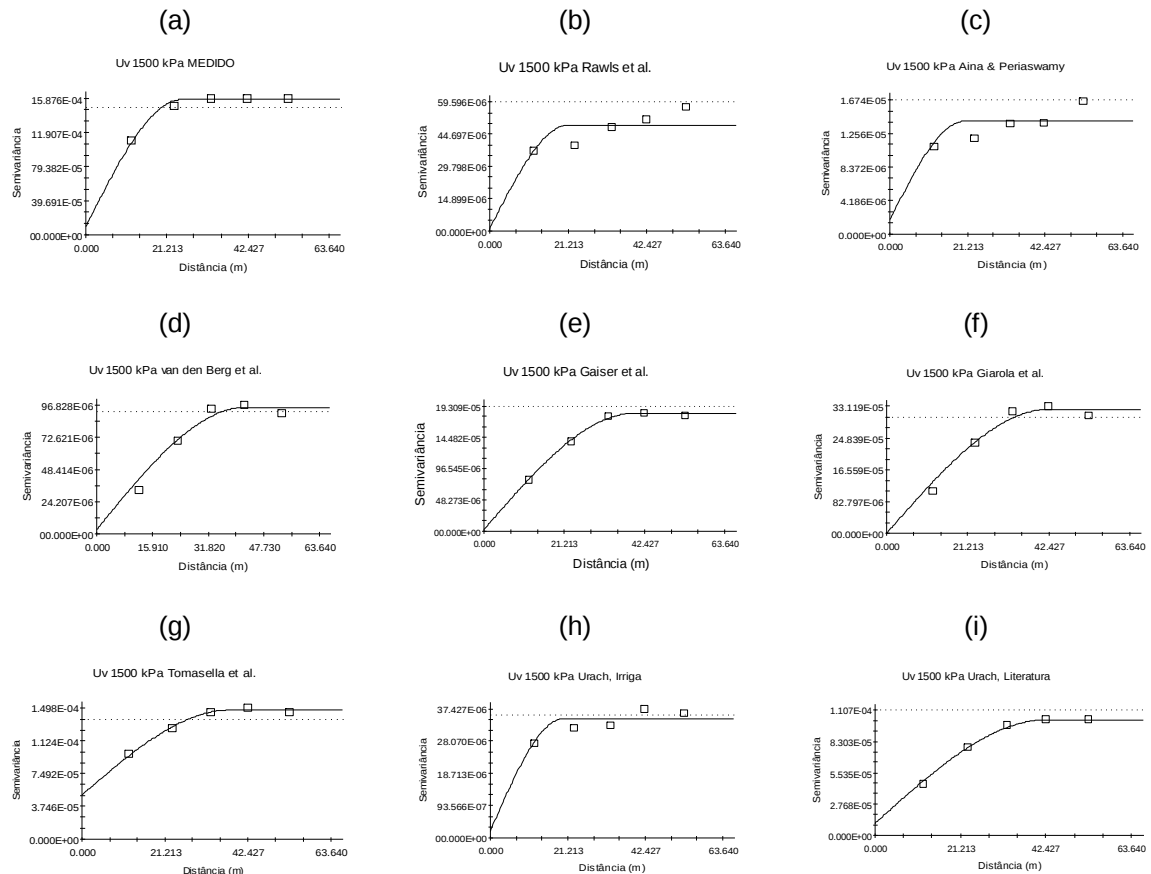


Figura 15 – Semivariogramas experimental e teórico para os valores de $\theta 1500\text{kPa}$ medido (a) e estimado pelas FPTs de Rawls et al. (b), Aina & Periaswamy (c), van den Berg et al. (d) Gaiser et al., (e) Giarola et al. (f) Tomasella et al. (g), Urach – Irriga (h) e Urach – Literatura (i).

Por outro lado, foram testados outros modelos teóricos de semivariogramas para estas FPTs, onde foi obtido um melhor coeficiente r^2 de ajuste do modelo, entretanto os coeficientes r^2 e CR da validação cruzada tiveram um pequeno incremento.

Para as FPTs que tiveram o melhor desempenho de estimativa da umidade volumétrica em cada uma das tensões avaliadas (10kPa, 33kPa e 1500kPa), conforme a classificação da tab. 9, foram elaborados os mapas de contorno da variável estimada (Fig. 16).

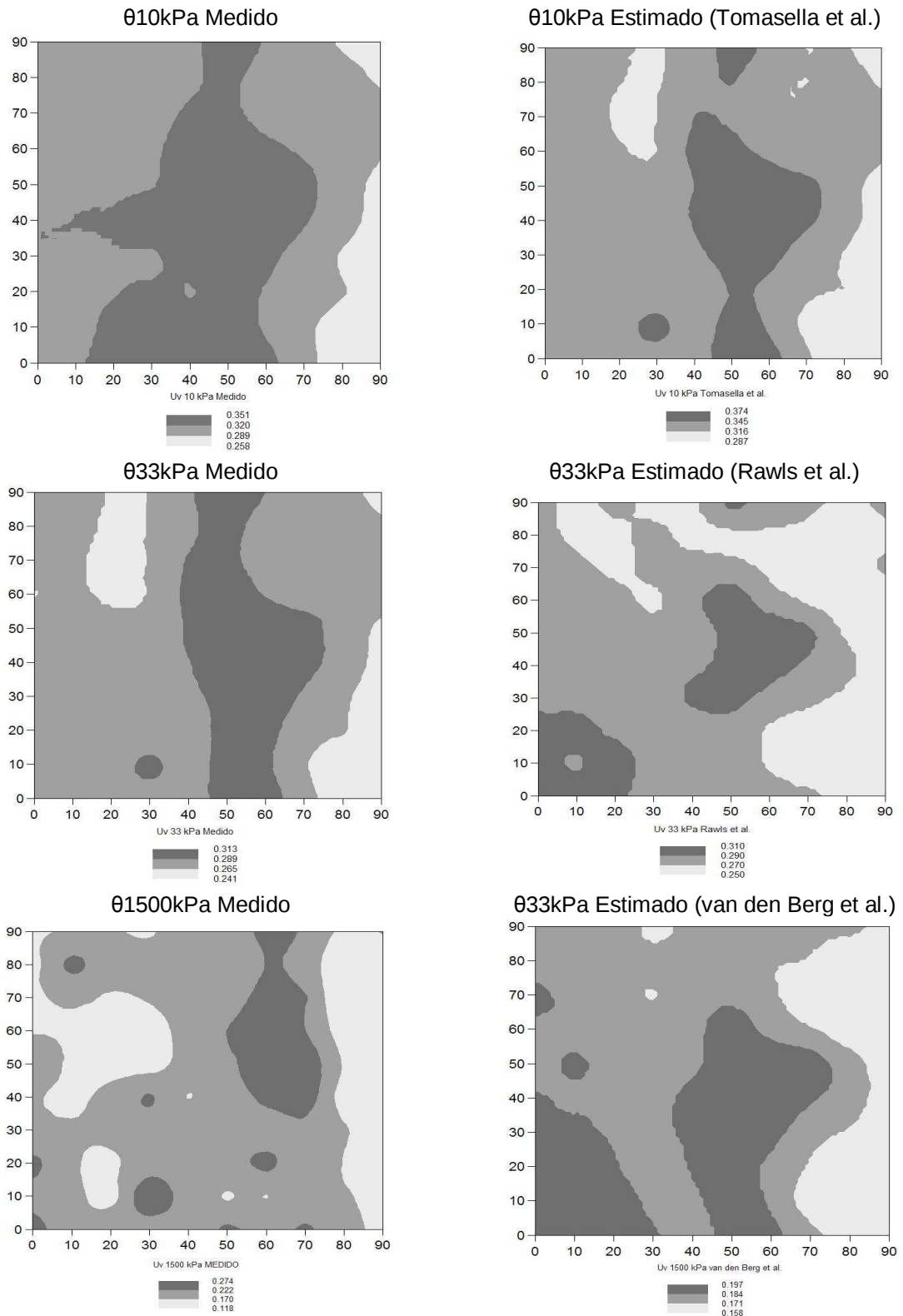


Figura 16- Mapas de contorno construídos a partir dos conjuntos de dados medidos de umidade volumétrica (θ) e estimados pelas FPTLs nas tensões de 10 kPa, 33 kPa e 1500 kPa.

Assim, foram calculados por krigagem os mapas para as FPTs de Tomasella et al. para $\theta_{10\text{kPa}}$, de Rawls et al.(1982) para $\theta_{33\text{kPa}}$ e van den Berg et al.(1997)

para 1500kPa. Pode-se constatar que os mapas gerados a partir das estimativas das FPTs não são similares aos mapas gerados para os valores medidos das variáveis 10kPa, 33kPa e 1500kPa.

7.4 Conclusões

Os melhores desempenhos de predição foram obtidos pela FPT de Tomasela et al.(2003) para a tensão de 10kPa, Rawls et al. (1982) para a tensão de 33kPa e van den Berg et al.(1997) para a tensão de 1500kPa.

A estrutura de dependência espacial dos conjuntos de dados medidos não foi eficientemente estimada pelas FPTs utilizadas neste estudo.

Para a umidade volumétrica na tensão de 33kPa houve razoável estimativa dos valores do alcance e do patamar, enquanto para as demais tensões os parâmetros geoestatísticos foram subestimados.

7.5 Referências

- AINA, P. O.; PERIASWAMY, S. P ., Estimating available water-holding capacity of Wester Nigerian soils from soil texture and bulk density using core and sieved samples. **Soil Science**, v.140, p.55-58, 1985.
- ARRUDA, F.B.; ZULLO JR., J. & DE OLIVEIRA, J.B. Parâmetros de solo para o cálculo da água disponível com base na textura do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.11, p.11-15, 1987.
- BOUMA, J. Using soil survey data for quantitative land evaluation. In: STEWART, B.A., ed. **Advances in soil science**. New York, Springer Verlag, v.9, 1989, p.177-213.
- BUDIMAN, M.; McBRATNEY, A.; 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, 50p (Documentos, 45). 2003.
- CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEM, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPA, A. E. Field scale variability of soil properties in central Iowa soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.47,p.1501-1511, 1994.

CHIRICO, G.B.; MEDINA, H.; ROMANO, N. Uncertainty in predicting soil hydraulic properties at the hillslope scale with indirect methods. **Journal of Hydrology**, v.334, p.405-422, 2007.

CORNELIS, W. M., J. RONSYN, M. Van MEIRVENNE, AND R. HARTMANN. Evaluation of pedotransfer functions for predicting the soil moisture retention curve. **Soil Science Society of America Journal, Madison**, v.65, p.638–648, 2001.

De JONG, R., CAMPBELL, C. A.; NICHOLAICHUK, W. Water retention equations and their relationship to soil organic matter and particle size distributions for disturbed samples. **Canadian Journal of Soil Science**, v.63, p.291-302, 1983.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 2ª ed. Rio de Janeiro, 1997, 212 pp.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro, Embrapa Solos, Brasília, Sistema de Produção de Informação, 2006, 306p.

FARKAS, C.; RAJKAI, K.; KERTÉSZ, M.; BAKACSI, Z.; MEIRVENNE, M. Spatial variability of soil hydro-physical properties: A case study in Herceghalom, Hungary. In: Krasilnikov, P.; Carré, F. & Montanarella, L. (eds.). **Soil geography and geostatistics: Concepts and applications**. Institute for Environment and Sustainability, Luxemburgo: Office for Official Publications of the European Communities.c.8, p.107-129. 2008.203p.

GAISER, T.; GRAEF, F.; CORDEIRO, J.C. Water retention characteristics of soils with contrasting Clay mineral composition in semi-arid tropical regions. **Australian Journal Soil Research**, v.38, p.523-536, 2000.

GAMMA DESIGN SOFTWARE. GS+: version 7.0. Geostatistics for the Environmental Sciences. Plainwell: **Gamma Design Software**, 2004. CD-ROM.

GEE, G. W.; BAUDER, J. W. Particle size analysis. In: Klute A. (ed), **Methods of soil Analysis**, Part I, Monograph 15. American Society of Agronomy, Madison. p.383-411.1986.

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

GIVI, J., PRASHER, S. O., PATEL, R. M. Evaluation of pedotransfer functions in predicting the soil water contents at field capacity and wilting point. **Agricultural Water Management**, v.70, p.83-96, 2004.

GOMES, N. M.; SILVA, A. M.; MELLO, C. R.; FARIA, M. A.; OLIVEIRA, P. M. Métodos de ajuste e modelos de semivariograma aplicados ao estudo da variabilidade

especial de atributos físico-hídricos do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.435-443, 2007.

GOOVAERTS, P. Geostatistics in soil science: state-of-art and perspectives. **Geoderma**, v.89, p.1-45, 1999.

HODNETT, M.G. & TOMASELLA, J. Marked differences between van Genuchten soil water-retention parameters for temperate and tropical soils: A new water-retention pedo-transfer functions developed for tropical soils. **Geoderma**, v.108, p.155-180, 2002.

JOURNEL, A. G.; HUIJBREGTS, C. H. J. **Mining geoestatics**. New York: Academic Press Inc., 1978. 600p.

LAL, R. Physical properties and moisture retention characteristics of some Nigerian soils. **Geoderma**, v.21, p.209-223, 1979.

MAYR, T., JARVIS, N.J., Pedotransfer functions to estimate soil water retention parameters for a modified Brooks– Corey type model. **Geoderma, Amsterdam**, v.91, p.1-9, 1999.

McBRATNEY, A.B.; MINASNY, B.; CATTLE, S.R. & VERVOORT, R.W. From pedotranfer functions to soil inference systems. **Geoderma**, v.109, p.41-73, 2002.

MINASNY, B.; McBRATNEY, A.B. & BRISTOW, K. Comparison of different approaches to the development of pedotransfer functions for water-retention curves. **Geoderma**, v.93, p.225-253, 1999.

MINITAB 14. MINITAB Statistical Software, Release 14 for Windows, State College, Pennsylvania. **Minitab Inc.** 2003. CD-ROM.

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 L. B.; RIBEIRO M. R.; JACOMINE P. K. T.; RODRIGUES, J. V. V.; MARQUES, F. A. Funções de Pedotransferência para predição da umidade retida a potenciais específicos em solos do Estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, p.315-323, 2002.

PACHEPSKY, YA.A., RAWLS, W.J., **Development of pedotransfer functions in soil hydrology**. Y. A. Pachepsky & W. J. Rawls (Eds). Elsevier, Amsterdam. p.vii-xiv. 2004. 540p.

PIDGEON, J. D. The measurement and prediction of available water capacity of Ferrallitic soils in Uganda. **Journal Soil Science**, v.23, p.431-441, 1972.

RAJKAI, K., KABOS, S., van GENUCHTEN, M.Th., JANSSON, P.E., Estimation of water retention characteristics from the bulk density and particle-size distribution of Swedish soils. **Soil Science**, v.161, p.832–845, 1996.

RAWLS, W.J.; BRAKENSIEK, D.L.; SAXTON, K.E. Estimation of soil water properties. **Trans. ASAE** v.25, n.5, p.1316-1320, 1982.

ROMANO, N., SANTINI, A. Effectiveness of using pedo-transfer functions to quantify the spatial variability of soil water retention characteristics. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v.202, p.137–157, 1997.

SCHAAP, M. G.; LEIJ, F. J.; van GENUCHTEN, M. Th. Neural network analysis for hierarchical prediction of soil hydraulic properties. **Soil Science America Journal**, v.62, p.847-855, 1998.

SCHEINOST, A. C.; SINOWSKI, W.; AUERSWALD, K. Regionalization of soil water retention curves in a highly variable soilscape, I. Developing a new pedotransfer function. **Geoderma, Amsterdam**, v.78, p.129-143, 1997.

SILVA, A.P.; TORMENA, C.A.; FIDALSKI, J.; IMHOFF, S. Funções de pedotransferência para as curvas de retenção de água e de resistência do solo à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. v.32, p.1-10, 2008.

TEDESCO, M.J., GIANELLO, C., BISSANI, C.A., BOHNEN, H. & VOLKWEISS, S.J. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2a ed. revisada e ampliada. Porto Alegre: Faculdade de Agronomia. UFRGS, 1995. 174p. (Boletim Técnico, 5).

TIMM, L.C.; PIRES, L.F.; ROVERATTI, R.; ARTHUR, R.C.J.; REICHARDT, K.; OLIVEIRA, J.C.M.; BACCHI, O.O.S. Field spatial and temporal patterns of soil water content and bulk density changes. **Scientia Agricola**, v.63, p. 55-64, 2006.

TOMASELLA, J.; HOODNETT, M. G.. Estimating soil water characteristics from limited data in Brazilian Amazonia. **Soil Science, Baltimore**, MD, v.163, p.190- 202, 1998.

TOMASELLA, J.; HODNETT, M.G. & ROSSATO, L. Pedotransfer functions for the estimation of soil water retention in Brazilian soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.64, p.327- 338, 2000.

TOMASELLA, J.; PACHEPSKY, Y.; CRESTANA, S.; RAWLS, J.W. Comparison of Two Techniques to Develop Pedotransfer Functions for Water Retention. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.67, p.1085-1092, 2003.

URACH, F. L. **Estimativa da retenção de água em solos para fins de irrigação**. 2007, 78f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo)- Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

van den BERG, M.; KLAMT, E.; REEUWIJK, L.P.V. & SOMBROEK, W.G. Pedotransfer functions for the estimation of moisture characteristics of Ferralsols and related soils. **Geoderma**, v.78, p.:161-180, 1997.

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.

VEREECKEN, H.; FEYEN, J.; MAES, J. Estimating the soil moisture retention characteristic from texture, bulk density and carbon content. **Soil Science**. v.148, p.389–403, 1989.

VIEIRA, S. R.; NIELSEN, D. R.; BIGGAR, J. W. Spatial variability of field-measured infiltration rate. **Soil Science Society of America Journal**. v.45, p.1040-1048, 1981.

VIEIRA, S.R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R.F., ALVAREZ, V.H. & SCHAEFER, C.E.G.R. (Eds.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.1, p.1-54, 2000.

WILLIAMS J.; PREBBLE, J. E.; WILLIAMS, W. T.; HIGNETT, C. T. The influence of texture, structure and clay mineralogy on the soil moisture characteristic. **Australian Journal of Soil Research**, East Melbourne, Austrália, v.21, p.15-32, 1983.

WÖSTEN, J. H. M.; FINKE, P. A.; JANSEN, M. J. W. Comparison of class and continuous pedotransfer functions to generate soil hydraulic characteristics. **Geoderma, Amsterdam**, v.66, p.227-237, 1995.

WÖSTEN, J. H. M.; PACHEPSKY, Y. A., RAWLS, W.J. Pedotransfer functions: bridging gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. **Journal of Hydrology, Amsterdam**, v. 251, p.123-150, 2001.

8 CAPÍTULO 3

FUNÇÕES DE PEDOTRANSFERÊNCIA PARAMÉTRICAS E VARIABILIDADE ESPACIAL DA CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA EM SOLOS DE VÁRZEA DO RS

8.1 Introdução

A curva de retenção de água (CRA) é uma propriedade físico-hídrica básica do solo, que é descrita pela relação entre o conteúdo de água no solo e a tensão com que este conteúdo está retido no solo. O conhecimento das características da CRA é necessário para o estudo de alguns processos no solo tal como infiltração, drenagem, o movimento de solutos e a disponibilidade da água para as plantas. A distribuição espacial destas características no solo é também um fator importante nas investigações de suprimento para as plantas e nas mudanças hidrológicas causadas pelo clima (van GENUCHTEN et al., 1991; WOSTEN, 1997; ROMANO e CHIRICO, 2004). A determinação de curvas de retenção da água do solo demanda muito tempo e trabalho, razão pela qual, esforços estão sendo empreendidos para desenvolver modelos que descrevem a CRA, a partir de propriedades do solo medidas rotineiramente no laboratório (BOUMA et al., 1989; WILLIAMS et al., 1992).

A estimativa das características de retenção de água no solo a partir de outras variáveis comumente disponíveis em banco de dados, as denominadas funções do pedotransferência (FPTs), tem aplicação direta em modelos hidrológicos que descrevem o movimento e o balanço da água no solo, sob o ponto de vista agrícola, ambiental ou hidrológico.

Tietje e Tapkenhinrichs (1993) e Wösten et al. (2001) definem as FPTs paramétricas como métodos de estimativa de parâmetros de funções de retenção ou de condutividade hidráulica, tais como os de Brooks & Corey (1964), Campbell (1974), e van Genuchten (1980). A vantagem das FPTs paramétricas é que as características hidráulicas estão descritas como curvas contínuas, permitindo assim o cálculo de conteúdo de água no solo em tensões definidas conforme o objetivo do estudo. Este tipo de FPT é mais apropriado para finalidades de modelagens porque as equações descrevem a totalidade da CRA (HODNETT e TOMASELLA, 2002). As FPTs paramétricas desenvolvidas por Rawls & Brakensiek (1985), Wösten e van Genuchten (1988), Vereecken et al. (1989), Scheinost et al. (1997), Minasny et al. (1999), Minasny e McBratney (2002) são exemplos de funções paramétricas desenvolvidas para solos de regiões temperadas. Para regiões tropicais, Van den Berg et al. (1997) desenvolveram FPTs pontuais para os parâmetros da equação de van Genuchten (1980) em latossolos (oxisols, Soil Taxonomy). Tomasella et al. (2000) utilizando dados de solos de várias regiões do Brasil, predominantemente das regiões Norte e Sudeste; Hodnett e Tomasella (2002) desenvolveram FPTs paramétricas com informações de solos do Brasil e de outros países tropicais e Tomasella et al. (2003) desenvolveram FPTs paramétricas ampliando o banco de dados utilizado por Tomasella et al. (2000) com mais informações de solos brasileiros.

Diversos pesquisadores têm afirmado a respeito da necessidade de testar uma FPT antes de sua aplicação. Donatelli et al. (2004) definem que quando uma FPT é testada por comparação entre os dados estimados e os medidos, em um conjunto de dados diferente daquele usado para o seu desenvolvimento, ou seja, para solos de uma outra região, o que se está avaliando é a confiança ou a aplicabilidade da FPT. Quando testada no conjunto de dados para a qual foi desenvolvida, esta se testando então, a exatidão da FPT.

Neste contexto, Van den Berg et al. (1997) discutem que as diferenças físicas e químicas entre os solos de regiões temperada e tropical podem ser as causas do fraco desempenho das FPTs “de solos temperados” quando testada a sua aplicabilidade aos solos de regiões tropicais, normalmente mais intemperizados. Hodnett e Tomasella (2002) observaram que, no caso dos oxisolos, o conteúdo de argila excede freqüentemente 60%, enquanto a maioria dos solos de regiões temperadas não atinge essa magnitude. McBratney et al. (2002) afirmam que uma

dada FPT não deveria ser extrapolada além da região geomórfica ou tipo de solo para a qual foi desenvolvida. Oliveira et al. (2002) alertam que o uso de FPTs só deve ser implementado após calibrações locais. Os autores afirmam que as FPTs tendem a ter melhor desempenho em sua aplicação quanto mais homogêneo forem os solos usados para calibração e os solos que terão os dados estimados.

Tomasella et al. (2000) comentam sobre as diferenças no teor de silte entre os solos usados na FPT de Tietje e Tapkenhinrichs (1993) e os solos brasileiros. Os autores citam que no banco de dados utilizados para desenvolvimento da FPT (Tomasella et al. 2000) o teor de silte no solo variou entre 15 e 20% e raramente foi superior a 50%, afirmando que geralmente nos solos brasileiros o teor de silte é baixo em relação aos solos de regiões temperadas. Esta diferença foi atribuída pelos autores como a causa do baixo desempenho das FPTs de Saxton et al.(1986) e Vereecken et al.(1989) testadas nos solos brasileiros. Tomasella e Hodnett (1998) afirmam que em regiões tropicais úmidas somente solos hidromórficos podem apresentar teor de silte maior do que 40%.

No presente estudo, os solos utilizados apresentam teores de silte variando entre 33,29 e 48,34%, com teor médio de 39,86%, o que associado aos baixos teores de argila (entre 11,6 e 18,1%) caracteriza uma condição diferenciada em relação a grande maioria dos solos brasileiros utilizados nos estudos de Tomasella et al. (2000; 2003) e de Hodnett e Tomasella (2002).

Recentemente diversos autores têm pesquisado a respeito do desempenho das FPTs em representar a estrutura de variabilidade espacial de variáveis hídricas observadas no campo. Sinowski et al. (1997) avaliaram dois procedimentos para regionalização das curvas de retenção de água no solo, utilizando uma função de pedotransferência desenvolvida para estimar os parâmetros de van Genuchten (1980), integrando a estrutura de dependência espacial na análise. Romano e Santini (1997) avaliaram o potencial de algumas FPTs em descrever a estrutura de variabilidade espacial da retenção de água no solo em uma transeção espacial de 5,0 km. Os autores concluíram que existem fortes similaridades entre as estruturas de variabilidade espacial detectadas pelas FPTs e as observadas. Entretanto, os semivariogramas construídos a partir dos dados estimados pelas FPTs diferiram dos semivariogramas construídos a partir dos dados medidos de conteúdo de água volumétrico os quais foram ajustados ao modelo de van Genuchten (1980). Romano (2004) relata que as FPTs demonstram grande potencial quando empregadas para

identificar o comportamento funcional de um sistema, referindo-se ao seu potencial em descrever a variabilidade espacial de propriedades hidráulicas do solo.

Nemes et al. (2003) relatam que novas propostas para o desenvolvimento de FPTs são continuamente introduzidas, entretanto, estudos sobre a aplicabilidade de FPTs existentes em locais diferentes daqueles para onde foram desenvolvidas são pouco relatados.

Neste contexto, o objetivo do estudo foi avaliar a aplicabilidade de cinco FPTs paramétricas desenvolvidas para estimar os parâmetros da equação de van Genuchten (1980) utilizada na determinação dos pontos da curva de retenção de água no solo, e o eventual potencial destas FPTs em descrever a estrutura de dependência espacial destas variáveis, a partir de um conjunto de dados coletados em uma área de solos hidromórficos no sul do Brasil.

8.2 Material e métodos

Em uma área de solo hidromórfico situada na região sul do Rio Grande do Sul foi demarcada uma malha com cem pontos regularmente espaçados entre si de 10m x 10m. Os solos da área são classificados em duas classes taxonômicas, sendo nas partes relativamente altas Planossolo Háplico Eutrófico gleissólico e nas partes relativamente baixas Gleissolo Háplico Ta Eutrófico solódico, segundo EMBRAPA (2006). Em cada ponto da malha foram coletadas duas amostras de solo com estrutura preservada utilizando-se anel volumétrico de 0,05m de diâmetro e 0,03m de altura ($54,48 \times 10^{-6} \text{m}^3$) na profundidade inicial de 0,075m para determinação de sete pontos da curva de retenção de água, nas tensões de 0, 1, 6, 10, 33, 100 e 1500kPa, densidade do solo (Ds) e porosidade total (Pt). Amostras deformadas foram coletadas na camada de 0- 0,20m e destinadas para a determinação da densidade de partículas (Dp), granulometria (frações argila, silte, areia total, areia grossa e areia fina) e atributos químicos do solo. Os pontos da curva de retenção de água no solo para as tensões de 1 e 6 kPa foram determinados em mesa de tensão, e os de 10, 33, 100 e 1500 kPa em Câmara de Pressão de Richards, relacionando os conteúdos de água no solo as respectivas tensões de equilíbrio.

A densidade do solo (Ds) foi determinada pelo método do anel volumétrico (EMBRAPA, 1997), aproveitando-se a mesma amostra usada para a determinação

dos pontos da curva de retenção de água no solo. A porosidade total foi considerada igual a umidade volumétrica de saturação (θ_{0kPa}). Para determinar a distribuição das partículas do solo por tamanho foi utilizado o método da pipeta (GEE e BAUDER, 1986), utilizando hidróxido de sódio 1N como agente dispersante. Segundo metodologias descritas em Tedesco et al. (1995), foram determinados os seguintes atributos químicos do solo: pH em água, Alumínio, Potássio, Cálcio, Magnésio e Sódio trocáveis. A acidez potencial ($H + Al$) foi determinada com o uso de acetato de cálcio 1N a pH 7 e titulado com NaOH 0.01N, conforme descrito em Embrapa (1997). A partir da soma dos cátions básicos mais a acidez potencial ($Al + H$) foi calculada a capacidade de troca de cátions potencial (CTC). O teor de carbono orgânico (Co) foi determinado pelo método Walkley-Black conforme Tedesco et al. (1995), sendo que a matéria orgânica (Mo) foi obtida multiplicando-se o teor de carbono orgânico por 1,724 (fator de van BEMMELEN).

Utilizou-se neste estudo cinco FPTs paramétricas que estimam os parâmetros da equação de van Genuchten conforme a equação apresentada a seguir:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + (\alpha \cdot \psi)^n\right]^m} \quad (7)$$

Onde:

θ = conteúdo de água no solo ($m^3 \cdot m^{-3}$)

θ_s = conteúdo de água na condição de solo saturado ($m^3 \cdot m^{-3}$)

θ_r = conteúdo residual de água no solo ($m^3 \cdot m^{-3}$)

ψ = tensão de retenção da água no solo (kPa)

α , m e n = parâmetros empíricos da equação, sendo $\alpha = kPa^{-1}$, m e n adimensionais.

Os parâmetros (α , n , θ_r e θ_s) do modelo proposto por van Genuchten (1980) para descrever a curva de retenção de água no solo, foram ajustados para as 100 curvas de retenção determinadas na área experimental (em cada ponto da malha experimental elaborou-se uma curva com os valores da umidade volumétrica θ

obtidos para as tensões de 0, 1, 6, 10, 33, 100 e 1500 kPa) utilizando o software SWRC - 3.0 desenvolvido por Dourado-Neto et al. (2001).

Foi assumido que o parâmetro m fosse calculado a partir da relação de Mualen (1976) $m = (1-1/n)$.

Para a configuração dos dados iniciais de entrada no software foi utilizado como critério de ajuste o procedimento manual para definição dos valores iniciais de α e n .

Foi adotado o critério de ajuste por regressão, sem restrições, para o cálculo do conteúdo de água na saturação (θ_s), enquanto para o conteúdo residual de água na amostra de solo (θ_r) foi adotado o critério de ajuste pelo método da extrapolação, considerando apenas valores positivos (maiores ou iguais a zero).

As FPTs paramétricas utilizadas neste estudo foram as desenvolvidas por Vereecken et al. (1989) a partir de uma série de solos da Bélgica, van den Berg et al. (1997) com análise de solos Oxisols (Latosolos) de regiões tropicais, Tomasella et al. (2000) a partir de um banco de dados de solos brasileiros, Hodnett e Tomasella (2002) com o banco de dados de Tomasella et al. (2000) ampliado, e Tomasella et al. (2003) com solos brasileiros e de outros países situados dentro de regiões tropicais.

Os indicadores estatísticos utilizados para avaliar o desempenho das FPTs em estimar o conteúdo de água em pontos específicos da curva de retenção de água no solo foram o erro médio (ME, equação 8), a raiz quadrada do erro médio ao quadrado (RMSE, equação 9) e o coeficiente de determinação r^2 .

$$ME = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\theta_{ei} - \theta_{mi}) \quad (8)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\theta_{ei} - \theta_{mi})^2} \quad (9)$$

onde:

n = número de pontos amostrais (100);

θ_{ei} = conteúdo de água estimado pela FPT e

m_i = conteúdo de água ajustado.

O ME é um indicador da exatidão da estimativa, revelando a tendência da FPT de superestimar os valores se positivo ou de subestimar se negativo, enquanto que o RMSE quantifica a dispersão dos valores medidos e estimados em torno da linha 1:1. Os valores estimados pelas FPTs e os medidos de cada variável também foram plotados em gráficos 1:1 para uma inspeção visual do desempenho das mesmas.

Para a comparação entre as FPTs avaliadas em descrever a curva de retenção de água como uma função contínua, os indicadores ME e RMSE foram calculados para todos os pontos da curva integradamente, conforme as equações 10 e 11 a seguir descritas:

$$ME = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (\theta e_{ij} - \theta m_{ij})}{n \times m} \quad (10)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m (\theta e_{ij} - \theta m_{ij})^2}{n \times m}} \quad (11)$$

onde:

θe_{ij} = conteúdo de água estimado pela FPT;

θm_{ij} = conteúdo de água ajustado (a partir dos dados medidos);

i = número de pontos amostrais (100);

j = número de tensões avaliadas (7).

As variáveis explanatórias utilizadas para estimar os parâmetros da equação de van Genuchten, nas diferentes FPTs avaliadas, são mostradas na tab. 11 e as faixas de amplitude destas variáveis nos solos utilizados no desenvolvimento das FPTs são mostradas na tab. 12.

Tabela 11 – Variáveis explanatórias utilizadas para estimativa dos parâmetros da equação de van Genuchten (1980) em cada uma das FPTs avaliadas.

FPT / Parâmetros estimados	Variáveis explanatórias								
	areia	ar gr	ar fin	silte	argila	Co	Ds	CTC	pH
Veerecken et al. (1989)									
θ_r					x	x			
θ_s					x		x		
$\text{Ln}\alpha$	x				x	x	x		
$\text{Ln}n$	x				x				
van den Berg et al. (1997)									
θ_r					x				
θ_s	x			x	x				
$\text{Ln}\alpha$									
$\text{Ln}n$				x	x	x		x	
Tomasella et al. (2000)									
θ_r	x	x	x		x		x		
θ_s	x	x	x		x	x	x		
$\text{Ln}\alpha$	x	x	x		x		x		
n	x	x	x		x				
Hodnett & Tomasella (2002)									
θ_r	x				x			x	x
θ_s	x				x		x	x	x
$\text{Ln}\alpha$				x		x		x	x
$\text{Ln}n$	x			x	x	x			x
Tomasella et al. (2003)* ¹									
θ_r	x								
θ_s	x	x					x		
$\text{Log}\alpha$	x	x	x		x		x		
$\text{Log}n$	x	x	x				x		

ar gr = areia grossa; ar fin = areia fina; Co = teor de carbono orgânico no solo; Ds = densidade do solo; CTC = capacidade de troca de cátions; *¹ Utilizou Me (umidade equivalente) como variável explanatória para θ_r , $\text{Ln}\alpha$ e $\text{Log}n$.

Tabela 12 – Faixa de magnitude (mínimos e máximos) dos atributos do solo utilizados na calibração das FPTs.

FPT (autores)	argila	silte	areia	Co	Ds
		----- % -----			Mg.m ⁻³
Solo de várzea testado	11,6-18,1 (14,3)	33,3-48,3 (39,8)	38,5-54,0 (45,8)	1,0-1,5 (1,2)	1,36-1,75 (1,60)
Vereecken et al. (1989)	0-54,4 (10,9)	0-80,7 (36,8)	5,6-97,0 (52,1)	0-6,6 (1,03)	(1,46)
van den Berg et al.(1997)	10-95	nd	nd	0,1-5,2	0,8-1,6
Tomasella et al. (2000)	1,7-96,0 (43,7)	0-71,0 (15,7)	--	0-5,9 (0,9)	0,78-1,91 (1,27)
Hodnett e Tomasella (2002)	0-95,4 (36,7)	0,4-77,4 (24,2)	0,5-99,0 (39,2)	0-30 (1,4)	0,28-1,88 (1,20)
Tomasella et al. (2003)	1,7-96,0 (49,2)	0-71,0 (16,3)	nd	0-6,39 (0,95)	0,72-1,91 (1,25)

Co = carbono orgânico no solo; Ds = densidade do solo; nd = dado não disponível; valores entre parênteses = valores médios.

Para avaliar a capacidade de cada FPT de descrever a estrutura de dependência espacial da variável resposta foi aplicada a análise geoestatística (JOURNEL & HUIJBREGTS, 1978; VIEIRA, 2000) que tem o semivariograma como a ferramenta chave para quantificar a dependência espacial entre os dados.

Inicialmente foram analisados os dados ajustados testando dois raios de alcance, o primeiro igual a maior diagonal da malha e o segundo igual a metade da maior diagonal da malha. Fixando cada uma destas distâncias de varredura foram testados ainda diferentes lags (2, 5, 7 e 10m). Assim, entre as oito combinações foi escolhida a que proporcionasse a melhor definição do semivariograma experimental. Buscou-se então, um semivariograma que apresentasse o maior numero de pontos na área de dependência espacial e de estabilização da semivariância. Foram considerados ainda o maior numero de pares por lag e os melhores índices do procedimento da validação cruzada. Desta forma definiu-se a distância de alcance como sendo igual a metade da diagonal da malha de pontos (90m x 90m) fixando-se o valor de 63,64m e a distância de lag em 5,0m. A partir destas definições foram gerados os semivariogramas e ajustados o modelo teórico esférico (JOURNEL & HUIJBREGTS, 1978) para as três tensões e cinco FPTs avaliadas. Os resultados destes estudos encontram-se no Apêndice F. O modelo esférico foi escolhido por ter sido o modelo que melhor ajustou aos dados medidos/ajustados e por ser o modelo freqüentemente usado em análise de variáveis físico-hídricas (SINOWSKI et al. 1997; ROMANO e SANTINI, 1997; HERBST et al., 2006; GOMES et al., 2007).

Durante a análise geoestatística foram ajustados somente modelos isotrópicos, considerando que a variação espacial é igual em todos os sentidos. Para analisar o grau de dependência espacial da variável, utilizou-se a classificação proposta por Cambardella et al. (1994) a qual considera o grau de dependência espacial forte quando a relação $C0/(C0+C) \leq 25\%$, moderada quando a relação $25 < C0/(C0+C) \leq 75\%$ e fraca quando a relação $C0/(C0+C) > 75\%$.

A técnica de validação cruzada foi utilizada para verificar a qualidade de ajuste do modelo esférico ao semivariograma experimental, sendo os seus resultados avaliados por meio do coeficiente de determinação (r^2) da regressão entre os valores estimados e os medidos, e pelo coeficiente de regressão (CR), que expressa o quanto se aproxima a reta de regressão da linha 1:1. A análise exploratória dos conjuntos de dados (estatística descritiva) e a análise geoestatística

foram executadas por meio dos softwares Minitab - 14, (MINITAB, 2003) e GS+ versão 7 (GAMMA DESIGN SOFTWARE, 2004), respectivamente.

8.3 Resultados e discussão

8.3.1 Análise das Funções de Pedotransferência

As FPTs utilizadas neste estudo para o cálculo dos parâmetros de van Genuchten estão relacionadas e descritas no Apêndice G.

Embora a análise comparativa dos indicadores estatísticos ME, RMSE e coeficiente de determinação r^2 , calculados para os valores ajustados e estimados pelas FPTs, deva ser conduzida em relação ao conjunto dos pares umidade/tensão, e assim representando o desempenho para toda a curva de retenção de água, foi inicialmente analisado individualmente para cada uma das tensões, com o objetivo de discutir algumas peculiaridades observadas em cada tensão.

A análise estatística descritiva dos valores dos conteúdos de água nas tensões de 0, 1, 6, 10, 33, 100 e 1500 kPa estimados pelas cinco FPTs avaliadas e ajustados aos dados medidos, juntamente com os indicadores estatísticos ME, RMSE e coeficiente de determinação r^2 são apresentados na tab. 13.

Pode-se observar que os dados ajustados apresentam valores altos do coeficiente de determinação r^2 , indicando que os parâmetros da equação de van Genuchten estimados para os dados medidos pelo software utilizado foram bem ajustados. O valor mais baixo de r^2 ($r^2 = 77,9\%$) foi para a umidade volumétrica na tensão de 100kPa (θ_{100kPa}), o que pode estar relacionado a distribuição dos dados medidos de θ_{100kPa} , que apresentaram assimetria moderada (coeficiente de assimetria = 0,69) e coeficiente de curtose igual a 2,38, o maior entre as sete tensões analisadas. Para as demais tensões o coeficiente de determinação variou entre 87,7% e 97,8%.

Com relação ao desvio padrão (DP) da média dos valores ajustados houve uma tendência de aumentar conforme aumenta a tensão com que a água está retida no solo, apresentando o maior valor de desvio padrão, corroborado pelo coeficiente de variação (CV), para a tensão de 1500kPa.

Os valores do erro médio (ME) e da raiz quadrada do erro médio quadrático (RMSE) para os valores ajustados são considerados baixos. O menor valor de ME

foi encontrado para $\theta_{100\text{kPa}}$ ($0,0003\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$), entretanto com o maior valor de RMSE ($0,0114\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$), o que é coerente com o valor do coeficiente de determinação (r^2) encontrado.

Os valores ajustados para todas as tensões foram normalmente distribuídos, o que é confirmado pelos valores menores do que o valor crítico estabelecido pela estatística do teste de Kolmogorov-Smirnov.

Com relação ao conjunto de valores da umidade volumétrica em cada uma das tensões, estimados pelas FPTs, os valores do coeficiente de determinação r^2 foram baixos, para a maioria das tensões e para todas as FPTs avaliadas. As melhores estimativas, baseadas no coeficiente r^2 , são para os conteúdos de água na saturação ou próximo desta (na tensão de 1kPa), com exceção da FPT de Tomasella et al. (2003).

Os valores do desvio padrão (DP) e, conseqüentemente do coeficiente de variação (CV), apresentaram distintos comportamentos entre as FPTs. Para as FPTs de van den Berg et al. (1997) e de Tomasella et al. (2000) houve tendência de aumento na magnitude do valor do DP e CV com o acréscimo da tensão, semelhante ao comportamento encontrado para os dados ajustados. Para as FPTs de Vereecken et al. (1989), Hodnett e Tomasella (2002) e Tomasella et al. (2003) a tendência no comportamento foi de diminuição nos valores do DP e CV com o acréscimo da tensão com que a água está retida no solo. Os valores do CV para as FPTs de Vereecken et al. (1989), van den Berg et al. (1997) e Hodnett e Tomasella (2002), apresentam magnitudes de valores semelhantes as encontradas para os dados ajustados, indicando uma boa similaridade na dispersão relativa dos dados de retenção de água entre estes conjuntos.

Os valores médios para o conteúdo de água em cada uma das tensões avaliadas, estimados pelas FPTs, comparativamente aos valores médios encontrados para os dados ajustados, foram melhor estimados pela FPT de Vereecken et al. (1989) para as tensões de 0kPa (saturação) e 1kPa, pela FPT de Hodnett e Tomasella (2002) para as tensões de 6, 10, 33 e 100kPa, e finalmente, para a tensão de 1500kPa pela FPT de Vereecken et al. (1989).

Tabela 13 – Análise exploratória do conjunto de dados ajustados de $\theta 0\text{kPa}$ a $\theta 1500\text{kPa}$ e estimados pelas FPTs, e valores dos indicadores estatísticos de avaliação de desempenho (ME, RMSE e r^2).

FPT / Variável	Média	DP	Mín.	Máx.	CV	K-S	ME	RMSE	r^2
Ajustados - $\theta 0\text{kPa}$	0.4053	0.0273	0.3420	0.4750	6,7	0.05	0,0005	0,0045	97,3
$\theta 1\text{kPa}$	0.3828	0.0213	0.3285	0.4382	5,6	0.05	0,0015	0,0075	88,0
$\theta 6\text{kPa}$	0.3308	0.0198	0.2864	0.3991	6,0	0.06	-0,0052	0,0086	87,8
$\theta 10\text{kPa}$	0.3128	0.0204	0.2665	0.3870	6,5	0.06	-0,0008	0,0084	88,2
$\theta 33\text{kPa}$	0.2733	0.0217	0.2249	0.3598	8,0	0.08	0,0055	0,0100	87,7
$\theta 100\text{kPa}$	0.2426	0.0240	0.1879	0.3372	9,9	0.06	0,0003	0,0114	77,9
$\theta 1500\text{kPa}$	0.1898	0.0357	0.1243	0.2921	18,8	0.08	-0,0028	0,0068	97,8
Vereecken - $\theta 0\text{kPa}$	0.3714	0.0210	0.3273	0.4397	5,7	0.06	-0,0339	0,0375	65,3
$\theta 1\text{kPa}$	0.3695	0.0206	0.3262	0.4359	5,6	0.06	-0,0133	0,0192	60,8
$\theta 6\text{kPa}$	0.3639	0.0194	0.3226	0.4246	5,3	0.06	0,0331	0,0387	22,3
$\theta 10\text{kPa}$	0.3604	0.0187	0.3202	0.4176	5,2	0.07	0,0476	0,0522	15,3
$\theta 33\text{kPa}$	0.3447	0.0160	0.3095	0.3881	4,6	0.05	0,0714	0,0750	8,2
$\theta 100\text{kPa}$	0.3150	0.0125	0.2879	0.3428	3,9	0.04	0,0724	0,0761	8,9
$\theta 1500\text{kPa}$	0.1854	0.0111	0.1613	0.2104	6,0	0.09	-0,0044	0,0329	16,6
Van den Berg - $\theta 0\text{kPa}$	0.3522	0.0231	0.3029	0.4262	6,6	0.06	-0,0530	0,0554	65,4
$\theta 1\text{kPa}$	0.3293	0.0206	0.2860	0.3910	6,3	0.05	-0,0535	0,0553	61,2
$\theta 6\text{kPa}$	0.2594	0.0145	0.2308	0.2925	5,6	0.07	-0,0714	0,0733	31,4
$\theta 10\text{kPa}$	0.2358	0.0136	0.2097	0.2674	5,8	0.08	-0,0769	0,0789	28,0
$\theta 33\text{kPa}$	0.1881	0.0131	0.1632	0.2202	6,9	0.08	-0,0852	0,0871	28,0
$\theta 100\text{kPa}$	0.1552	0.0127	0.1303	0.1871	8,2	0.09	0,0875	0,0897	29,3
$\theta 1500\text{kPa}$	0.1084	0.0108	0.0841	0.1377	10,0	0.05	-0,0814	0,0874	22,0
Tomasella 2000 - $\theta 0\text{kPa}$	0.4518	0.0219	0.4056	0.5233	4,9	0.06	0,0466	0,0493	64,1
$\theta 1\text{kPa}$	0.4401	0.0181	0.3964	0.4992	4,1	0.07	0,0572	0,0590	56,6
$\theta 6\text{kPa}$	0.3993	0.0166	0.3614	0.4416	4,2	0.14	0,0684	0,0736	1,0
$\theta 10\text{kPa}$	0.3817	0.0220	0.3450	0.4458	5,8	0.13	0,0689	0,0769	10,0
$\theta 33\text{kPa}$	0.3394	0.0379	0.2903	0.4623	11,2	0.12	0,0662	0,0839	22,8
$\theta 100\text{kPa}$	0.2889	0.0538	0.2262	0.4782	17,8	0.12	0,0591	0,0906	24,7
$\theta 1500\text{kPa}$	0.2401	0.0712	0.1648	0.5260	29,7	0.17	0,0504	0,1030	12,6
Hodnett - $\theta 1\text{kPa}$	0.3495	0.0233	0.3010	0.4250	6,7	0.05	-0,0557	0,0580	65,3
$\theta 1\text{kPa}$	0.3444	0.0230	0.2973	0.4176	6,7	0.05	-0,0385	0,0412	61,1
$\theta 6\text{kPa}$	0.3135	0.0210	0.2734	0.3737	6,7	0.05	-0,0174	0,0266	25,6
$\theta 10\text{kPa}$	0.2967	0.0197	0.2577	0.3503	6,7	0.04	-0,0161	0,0265	19,8
$\theta 33\text{kPa}$	0.2550	0.0163	0.2198	0.2929	6,4	0.05	-0,0183	0,0283	14,6
$\theta 100\text{kPa}$	0.2235	0.0137	0.1925	0.2508	6,1	0.08	-0,0191	0,0299	12,5
$\theta 1500\text{kPa}$	0.1801	0.0102	0.1565	0.1971	5,6	0.09	-0,0096	0,0355	7,0
Tomasella 2003 - $\theta 0\text{kPa}$	0.3012	0.0389	0.1815	0.4527	12,9	0.06	-0,1041	0,1085	37,7
$\theta 1\text{kPa}$	0.2902	0.0353	0.1778	0.4196	12,2	0.06	-0,0926	0,0973	28,5
$\theta 6\text{kPa}$	0.2476	0.0269	0.1580	0.3331	10,9	0.04	-0,0832	0,0883	4,9
$\theta 10\text{kPa}$	0.2296	0.0245	0.1480	0.3049	10,6	0.04	-0,0832	0,0882	2,2
$\theta 33\text{kPa}$	0.1887	0.0198	0.1242	0.2470	10,5	0.03	-0,0846	0,0895	0,1
$\theta 100\text{kPa}$	0.1580	0.0165	0.1063	0.2055	10,5	0.03	-0,0847	0,0899	0,9
$\theta 1500\text{kPa}$	0.1115	0.0114	0.0813	0.1424	10,2	0.05	-0,0782	0,0877	4,9

DP = Desvio padrão; Min. = valor mínimo; Máx.= valor máximo; CV = coeficiente de variação (%);K-S= teste de normalidade de Kolmogorov-Smirnov (valor crítico = 0.121, para $\alpha=10\%$).

O valor médio para 0kPa, estimado para o conjunto de dados ajustados, mostra o valor de $0,4053\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$, o qual teoricamente deveria corresponder, e não superar, ao valor médio da porosidade total calculada, que foi de $0,4057\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$. Isto ocorre para o conjunto de dados ajustados e para a maioria das FPTs, exceto para a FPT de Tomasella et al. (2000), a qual estima o valor de 0kPa igual a $0,4518\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$, superior portanto, ao valor da porosidade total do solo. Esta FPT apresenta ainda o maior valor médio estimado para 01500kPa, superior ao valor calculado para os dados ajustados.

O teste de normalidade da distribuição dos dados de Kolmogorov-Smirnov, aplicado a cada conjunto dos 100 valores estimados em cada uma das sete tensões, para as cinco FPTs avaliadas, apresentou valor de K-S calculado menor que o valor crítico (0,121 para $\alpha=10\%$) para todas as FPTs, exceto a de Tomasella et al. (2000), nas tensões de 6, 10, 33, 100 e 1500kPa.

A análise individualizada para cada uma das tensões avaliadas (tab. 13), dos indicadores estatísticos de qualidade das FPTs, ME e RMSE demonstra o que já foi discutido em relação as FPTs de Vereecken et al. (1989) e Hodnett e Tomasella (2002), as quais apresentam os menores valores de ME e RMSE. Para as tensões de 0, 1 e 1500kPa o melhor desempenho é obtido pela FPT de Vereecken et al. (1989), com valores de ME de -0,0339, -0,0133 e $-0,0044\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$, respectivamente, e para as tensões de 6, 10, 33 e 100kPa pela FPT de Hodnett e Tomasella (2002) com os valores de -0,0174, -0,0161, -0,0183 e $-0,0191\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$, respectivamente.

Romano e Santini (1997) avaliando a FPT de Vereecken et al. (1989) em uma transeção nos solos da Itália, encontraram valores semelhantes de ME para 01kPa, 010kPa e 0100kPa iguais a -0,0041, 0,0133 e $-0,0080\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$, respectivamente.

As FPTs de Hodnett e Tomasella (2002) e Tomasella et al. (2003) subestimaram os valores do conteúdo de água em todas as tensões, o que pode ser comprovado pelo sinal de ME.

Os indicadores estatísticos ME e RMSE calculados para o conjunto de pontos e tensões de toda a curva de retenção, conforme as equações 10 e 11 são apresentados na tab. 14.

Da análise da tabela pode-se identificar que as FPTs de Vereecken et al. (1989) e Hodnett e Tomasella (2002) apresentam praticamente o mesmo valor para ME, $0,0247\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ e $-0,0249\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$, respectivamente, com a primeira apresentando tendência de superestimar os valores da curva e a segunda de

subestimar. Com relação ao RMSE, a FPT de Hodnett e Tomasella (2002) apresenta um valor menor ($0,0367\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$) do que a FPT de Vereecken et al. (1989) ($0,0514\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$), indicando uma menor dispersão relativa dos valores de retenção de água. Cornelis et al. (2001) avaliando o desempenho de algumas FPTs paramétricas encontraram valores de ME semelhantes a estes (variando de $-0,0226\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ a $-0,0582\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$), e também para RMSE (de $0,0412\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ a $0,0774\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$).

Tabela 14 – Indicadores estatísticos ME ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$) e RMSE ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$) para o conjunto de dados ajustado e estimados pelas FPTs, integrado para todas as tensões avaliadas.

FPTs	ME	RMSE
Ajustados / Medidos	-0,0001	0,0082
Vereecken et al. (1989)	0,0247	0,0514
van den Berg et al. (1997)	-0,0727	0,0765
Tomasella et al. (2000)	0,0596	0,0785
Hodnett & Tomasella (2002)	-0,0249	0,0367
Tomasella et al. (2003)	-0,0872	0,0930

O melhor desempenho geral proporcionado pelas FPTs de Vereecken et al. (1989) e Hodnett e Tomasella (2002) podem estar relacionados com a melhor representatividade do teor de silte no banco de dados usado no desenvolvimento de suas FPTs, de 36,8 e 24,2% respectivamente (tab. 12), associado também aos menores teores de argila, quando comparados com as demais FPTs. Nos solos utilizados por Hodnett e Tomasella (2002) podem-se identificar alguns solos classificados como planossolos e gleissolos (HODNETT e TOMASELLA (2002, p.159), que podem estar influenciando as similaridades com os solos testados no presente estudo.

A FPT que apresentou o desempenho mais fraco, considerando os indicadores propostos, foi a de Tomasella et al. (2003), com valores de ME e RMSE de $-0,0872\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ e $0,0930\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$, respectivamente.

Holzhey e Kimble (1988) citados por Tomasella et al. (2000) relatam que a curva de retenção de água em latossolos (como os utilizados por van den Berg et al. (1997)) com uma estrutura granular fina e bem desenvolvida é semelhante a de um argissolo sob altas sucções, entretanto, para sucções intermediárias reflete o baixo conteúdo de silte e, a baixas sucções, mostra um arqueamento da curva que reflete o grande número de poros maior do que 0,1mm de diâmetro. Nesta parte da curva o

comportamento seria então semelhante ao de um solo arenoso. No solo avaliado no presente estudo a maior concentração de poros é inferior a 0,1mm, com predominância da microporosidade (poros inferiores a 0,05mm) sobre a macroporosidade. Associado a esta característica, o alto teor de silte (39,8%) e a maior densidade do solo, em relação aos valores médios dos solos utilizados nas FPTs avaliadas, conferem aos solos hidromórficos deste estudo marcantes diferenças em relação aos solos utilizados nas FPTs, principalmente nos de van den Berg et al. (1997), Tomasella et al. (2000) e Tomasella et al. (2003), que podem estar relacionadas aos desempenhos mais fracos destas FPTs.

Os valores dos dados ajustados de θ_{10kPa} foram plotados em um gráfico de dispersão com linha 1:1, em relação aos valores estimados pelas FPTs (Fig.17).

Pode-se observar o melhor ajuste dos valores estimados pela FPT de Hodnett e Tomasella (2002), a relativa dispersão dos pontos em torno da linha 1:1 e a tendência em subestimar estes valores, que pode ser observada na figura pela posição da maioria dos pontos estar abaixo da linha 1:1, que já havia sido identificada pelo sinal de ME (tab. 13).

Verifica-se também a razoável distribuição dos pontos relativos aos valores estimados pela FPT de Vereecken et al. (1989), superestimando os valores de θ_{10kPa} e com maior afastamento da linha 1:1 em relação aos valores estimados pela FPT de Hodnett e Tomasella (2002).

Como já havia sido identificado pelos valores de ME e RMSE, as FPTs de Tomasella et al. (2000) e (2003), juntamente com a FPT de van den Berg et al. (1997), apresentam os desempenhos mais fracos de estimativa, que pode ser observado na Fig. 17 pelo maior afastamento do conjunto de pontos estimados por estas FPTs em relação a linha 1:1 (maior valor de ME) e pela maior dispersão em torno desta linha (maior valor de RMSE).

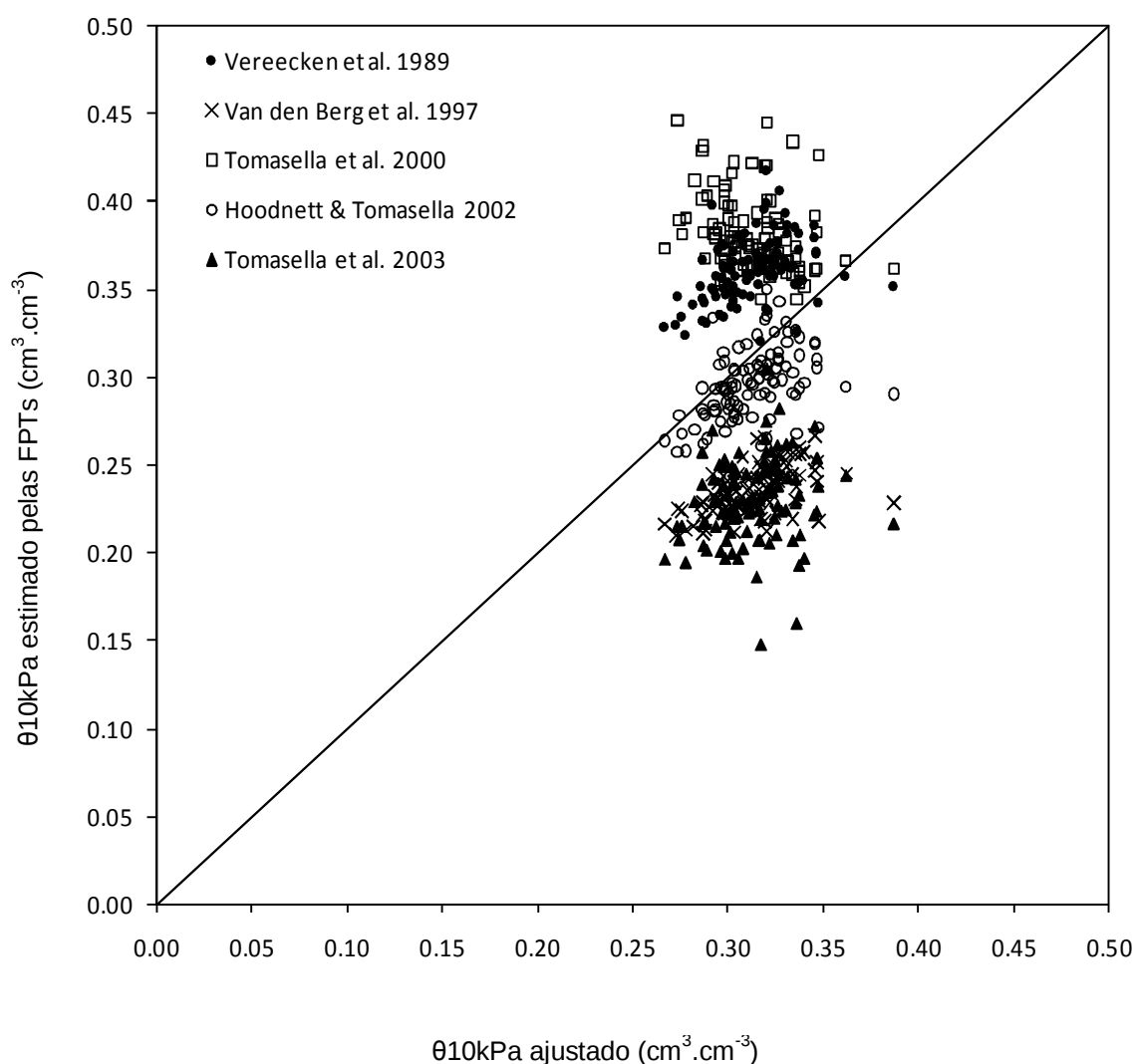


Figura 17 – Dispersão dos valores estimados pelas FPTs e ajustados de θ_{10kPa} em torno da linha 1:1.

Praticamente o mesmo comportamento descrito para θ_{10kPa} , pode ser observado em relação aos valores de θ_{33kPa} (Fig. 18), com a FPT de Hodnett e Tomasella (2002) apresentado o menor afastamento e dispersão dos pontos estimados de θ_{33kPa} em relação a linha 1:1, e da mesma forma anterior, com tendência de subestimar estes valores.

A FPT de Vereecken et al. (1989) segue a mesma tendência apresentada para θ_{10kPa} , superestimando os valores de θ_{33kPa} . Para as demais FPTs pode-se perceber que são praticamente mantidos os afastamentos e a dispersão dos pontos estimados em relação a linha 1:1, com fraco desempenho de estimativa destas FPTs.

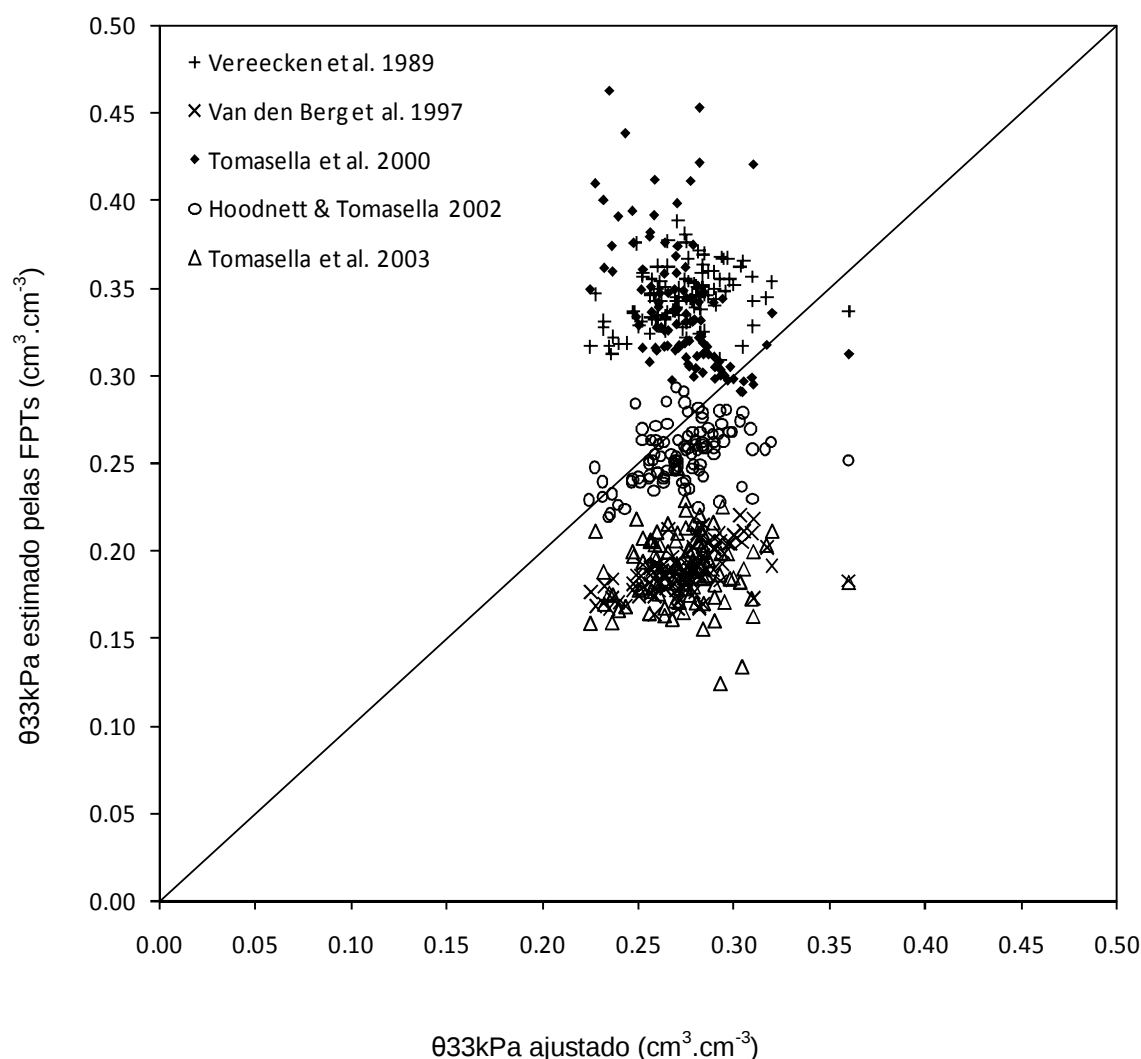


Figura 18 – Dispersão dos valores estimados pelas FPTs e ajustados de θ_{33kPa} em torno da linha 1:1.

Para os valores estimados pelas FPTs de $\theta_{1500kPa}$, a Fig. 19 mostra o comportamento da dispersão em relação a linha 1:1, na qual pode-se observar o comportamento semelhante entre todas as FPTs, exceto para a FPT proposta por Tomasella et al. (2000). Nesta tensão, todas as FPTs apresentaram uma tendência de estimar um valor constante para qualquer valor de $\theta_{1500kPa}$, exceto para a FPT de Tomasella et al. (2000), que apresenta uma dispersão mais aleatória dos pontos estimados.

Embora os valores relativamente baixos de ME apresentados pelas FPTs de Hodnett e Tomasella (2002) e Vereecken et al. (1989), de $-0,0096\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ e $-0,0044\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$, respectivamente (tab. 13), isto ocorre devido a quase simétrica distribuição dos valores estimados por estas FPTs em relação a linha 1:1, com

aproximadamente metade dos valores superestimando (sinal positivo para ME) e os demais subestimando os valores de $\theta_{1500\text{kPa}}$ (sinal positivo para ME), o que induz, no somatório, ao baixo valor de ME. Para a FPT de Hodnett e Tomasella (2002) este comportamento é detectado pelo valor de RMSE, que é superior ao valor de RMSE para $\theta_{10\text{kPa}}$, no qual o desempenho da FPT foi melhor. O mesmo não ocorre para a FPT de Vereecken et al. (1989), a qual apresentou o valor de RMSE para $\theta_{1500\text{kPa}}$ menor do que o calculado para $\theta_{10\text{kPa}}$, o que poderia, erroneamente, conduzir a uma conclusão de melhor desempenho baseando-se apenas nos dois indicadores.

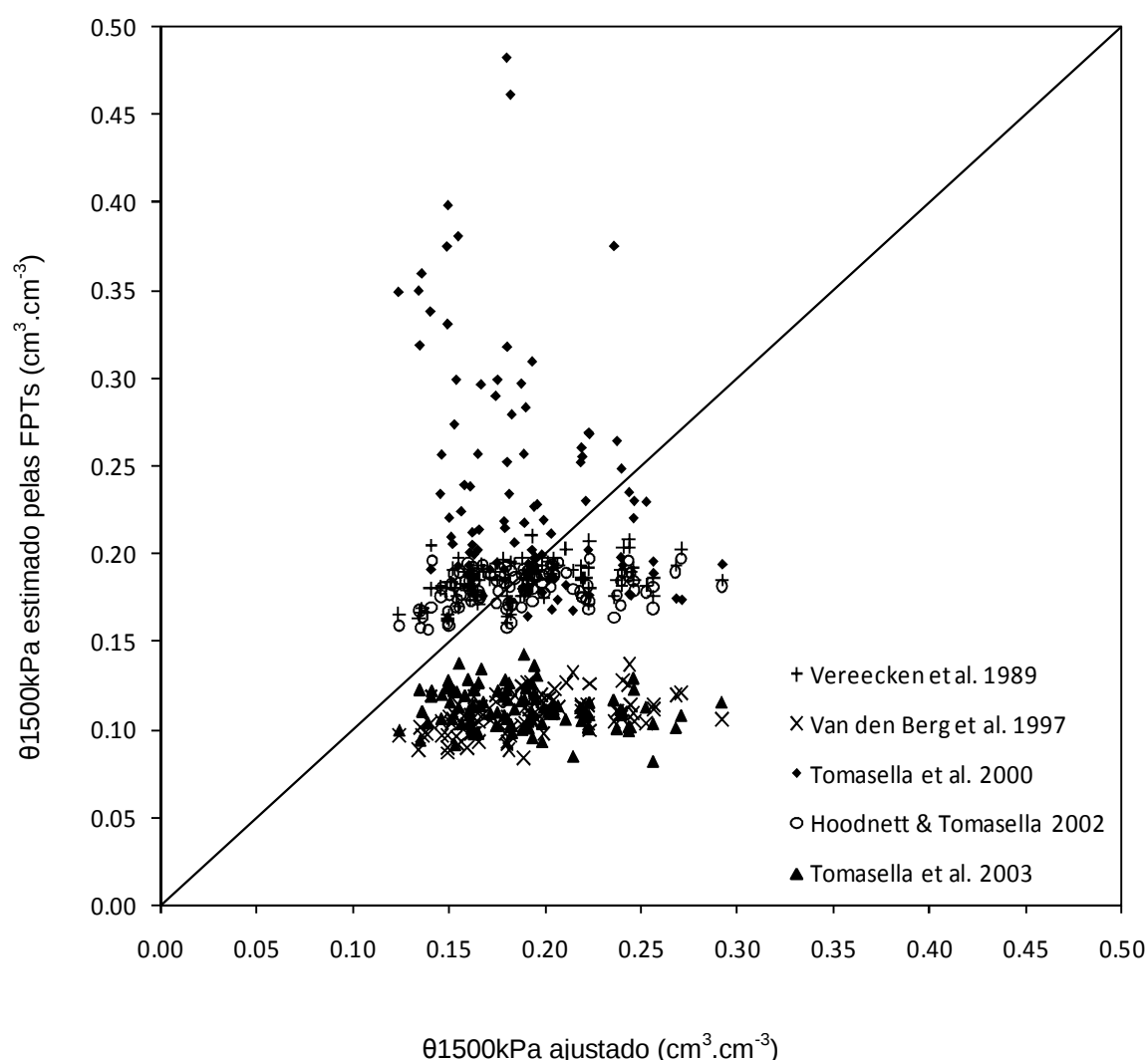


Figura 19 – Dispersão dos valores estimados pelas FPTs e ajustados de $\theta_{1500\text{kPa}}$ em torno da linha 1:1.

Para as FPTs que apresentaram melhor desempenho na estimativa de todos os pontos da curva (tab. 14), com os valores dos indicadores ME e RMSE calculados pelas equações 10 e 11, respectivamente, Vereecken et al. (1989) e Hodnett e Tomasella (2002), foram elaborados os gráficos de dispersão em torno da linha 1:1 para cada uma destas FPTs nas sete tensões avaliadas. Assim, os gráficos de dispersão entre os valores dos dados ajustados pela equação de van Genuchten e os valores estimados pelas FPTs de Vereecken et al. (1989) e Hodnett e Tomasella (2002) são apresentados nas figuras 20 e 21.

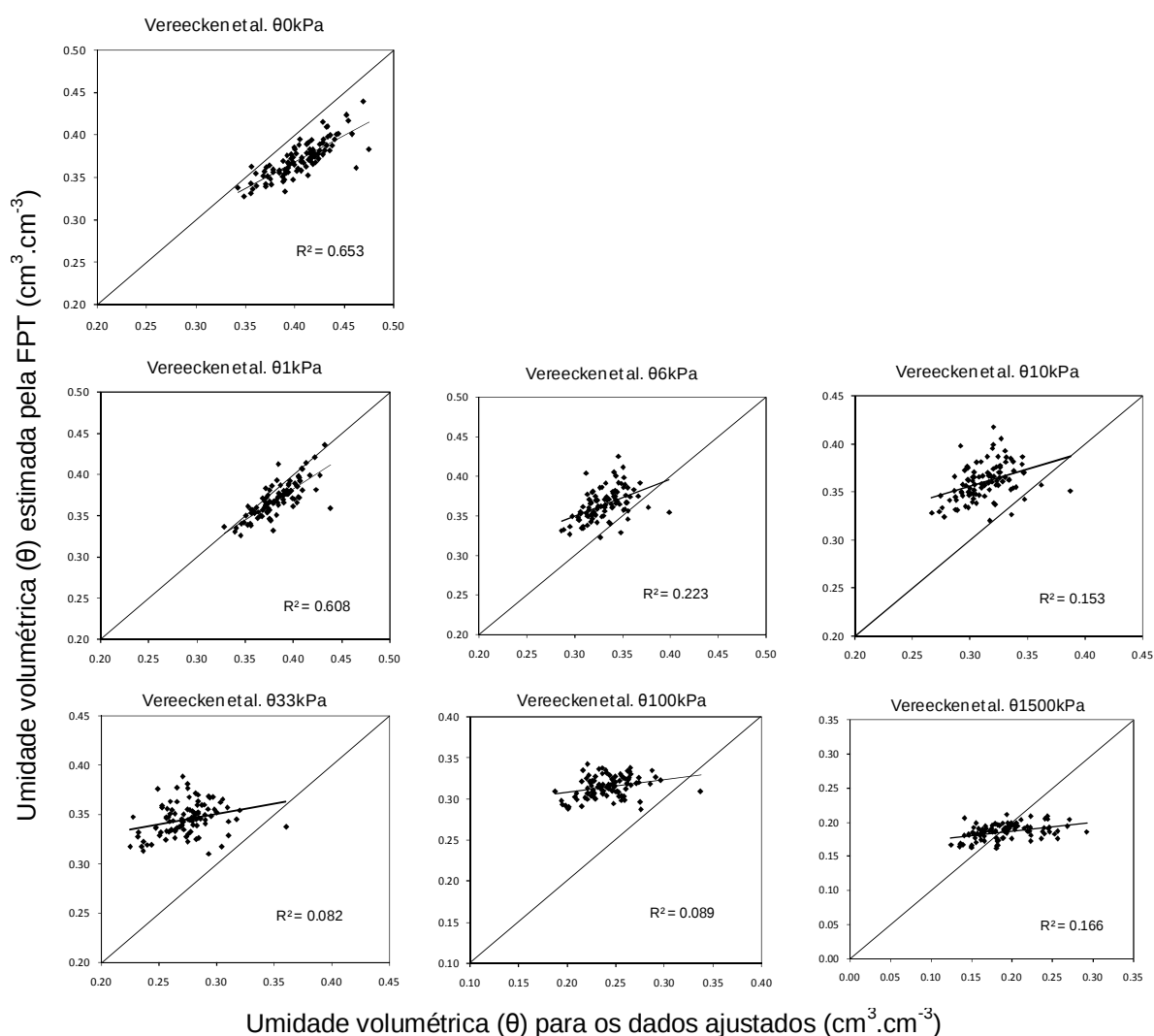


Figura 20 – Gráficos de dispersão entre os valores ajustados e os estimados pela FPT de Vereecken et al. 1989.

Nas Figuras 20 e 21 pode-se observar que somente para as tensões próximas da saturação houve bom desempenho destas FPTs. Ambas FPTs estimaram relativamente bem os conteúdos de água nas tensões de 0kPa, 1kPa e 6

kPa, com a FPT de Vereecken et al. (1989) apresentando um modesto melhor desempenho do que a FPT de Hodnett e Tomasella (2002). Nestas tensões as duas FPTs apresentam intercepto próximo de zero e coeficiente angular próximo da unidade mostrando o bom ajuste dos dados estimados pelas FPTs com os dados ajustados. Resultados semelhantes foram encontrados por Borgesen e Schaap (2005) avaliando três FPTs paramétricas com o desempenho da FPT desenvolvida pelos autores para solos da Dinamarca. Cornellis et al. (2001) também encontrou melhores ajustes próximos da saturação ao testar o desempenho de nove FPTs em solos da Bélgica.

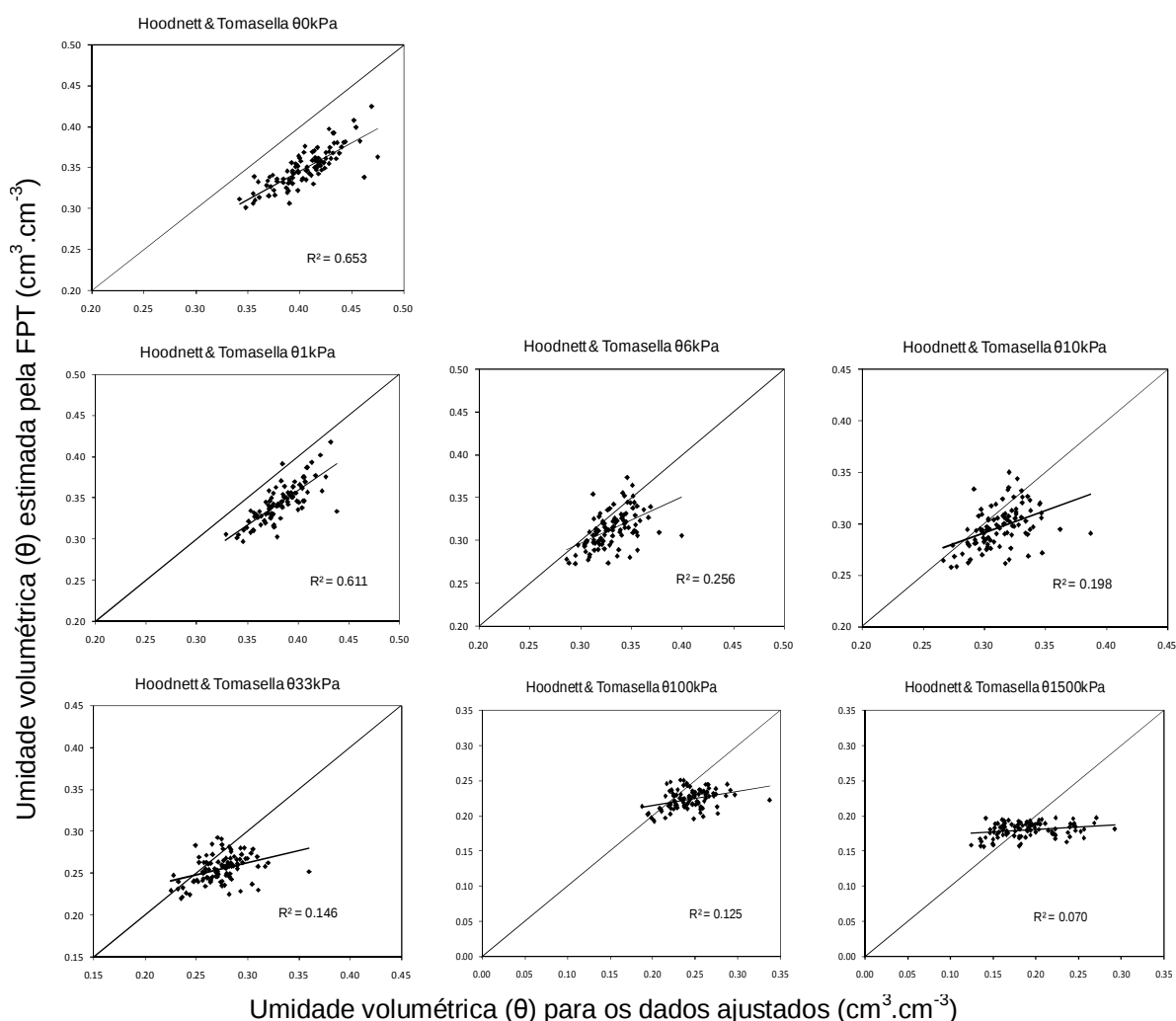


Figura 21 – Gráficos de dispersão entre os valores ajustados e os estimados pela FPT de Hodnett & Tomasella (2002).

Conforme aumenta a tensão, ou seja, na região mais seca da curva, o intercepto aumenta tendendo a assumir um valor constante para o conteúdo volumétrico de água no solo para a tensão de 1500kPa. O mesmo comportamento é

observado para o coeficiente angular, com tendência contrária, diminuindo com o aumento da tensão.

As FPTs de van den Berg et al. (1997), Tomasella et al. (2000) e Tomasella et al. (2003) apresentaram o mesmo comportamento das FPTs mostradas nas Figuras 20 e 21 com relação ao intercepto e o coeficiente angular, com maior afastamento e dispersão dos pontos em torno da linha 1:1.

8.3.2 Análise da variabilidade espacial

Os resultados da análise geoestatística são apresentados na tab. 15, na qual é encontrada a variância dos dados ajustados de $\theta 10\text{kPa}$, $\theta 33\text{kPa}$ e $\theta 1500\text{kPa}$ e estimados pelas FPTs juntamente com os parâmetros dos semivariogramas teóricos esféricos, efeito pepita (C_0), patamar (C_0+C) e alcance (A), bem como o coeficiente de determinação r^2 do ajuste. Também é apresentado o Grau de Dependência Espacial (GDE, CAMBARDELLA et al., 1994) e os resultados do procedimento de validação cruzada (r^2 e CR).

Analisando a tab. 15, observa-se que para todos os conjuntos de dados analisados, tanto os dados ajustados como os estimados pelas FPTs, o valor da semivariância total encontrada na análise geoestatística apresentou boa correspondência com o valor da variância dos dados calculados pela estatística clássica. Esta semelhança na magnitude dos valores de semivariância total e variância dos dados pode indicar a ausência de tendência nas séries de dados espaciais (ROMANO e SANTINI, 1997).

A semivariância total, ou patamar, foi melhor estimada pela FPT de Tomasella et al.,(2000) e fracamente estimada pela FPT de van den Berg et al. (1997), as quais estimaram 98,0% e 42,8%, respectivamente, do valor calculado para os dados ajustados. Exceto a FPT de Tomasella et al.(2003), as demais FPTs subestimaram o valor da semivariância total para $\theta 10\text{kPa}$ em relação ao valor para os dados ajustados.

Para os dados de $\theta 10\text{kPa}$, os valores da distância de correlação espacial, expressa pelo alcance, encontrados pelas FPTs foram menores do que o valor encontrado para os dados ajustados. A FPT de Vereecken et al.(1989) foi a que melhor definiu o valor de alcance em relação ao valor para os dados ajustados

(3,3% menor). As demais FPTs subestimaram o valor do alcance, com a FPT de Tomasella et al.(2003) apresentando a pior estimativa (62,5% menor).

Tabela 15 – Parâmetros geoestatísticos e resultados da validação cruzada para os dados ajustados de θ_{10} , θ_{33} e θ_{1500} kPa e estimados pelas FPTs, ambos ajustados ao modelo experimental esférico.

FPT	Variân.	Semivariância		Alcance (A)	r ^{2*}	GDE (%)	Validação cruzada	
		E. pepita (C0)	Patamar (C0+C)				r ²	CR
θ10kPa								
Ajustados	4,4x10 ⁻⁴	2,3x10 ⁻⁴	4,9x10 ⁻⁴	53,90	0,84	46,9	0,23	0,98
Vereecken et al.	3,8x10 ⁻⁴	1,8x10 ⁻⁴	3,8x10 ⁻⁴	52,10	0,96	48,9	0,25	0,89
Van den Berg, et al.	2,1x10 ⁻⁴	7,0x10 ⁻⁶	2,1x10 ⁻⁴	39,10	0,83	3,5	0,60	0,95
Tomasella et al. 00 ^{*1}	4,9x10 ⁻⁴	7,8x10 ⁻⁵	4,8x10 ⁻⁴	33,30	0,88	16,4	0,39	0,88
Hodnett et al.	3,9x10 ⁻⁴	1,1x10 ⁻⁴	3,8x10 ⁻⁴	43,60	0,92	30,0	0,39	0,93
Tomasella et al. 03 ^{*2}	5,9x10 ⁻⁴	4,7x10 ⁻⁵	5,8x10 ⁻⁴	20,20	0,41	8,0	0,07	0,36
θ33kPa								
Ajustados	4,8x10 ⁻⁴	2,1x10 ⁻⁴	5,4x10 ⁻⁴	50,70	0,83	38,2	0,29	0,97
Vereecken et al.	2,7x10 ⁻⁴	1,3x10 ⁻⁴	2,6x10 ⁻⁴	46,50	0,90	49,8	0,23	0,86
Van den Berg, et al.	1,8x10 ⁻⁴	1,2x10 ⁻⁵	1,8x10 ⁻⁴	38,40	0,84	6,4	0,58	0,97
Tomasella et al. 00	1,4x10 ⁻³	9,9x10 ⁻⁵	1,4x10 ⁻³	38,90	0,93	7,2	0,60	0,96
Hodnett et al.	2,8x10 ⁻⁴	6,9x10 ⁻⁵	2,6x10 ⁻⁴	44,60	0,95	26,4	0,45	0,95
Tomasella et al. 03	4,3x10 ⁻⁴	3,4x10 ⁻⁵	4,3x10 ⁻⁴	18,80	0,37	8,0	0,05	0,31
θ1500kPa								
Ajustados	1,3x10 ⁻³	1,5x10 ⁻⁴	1,4x10 ⁻³	28,50	0,64	11,0	0,25	0,74
Vereecken et al.	1,3x10 ⁻⁴	4,1x10 ⁻⁵	1,2x10 ⁻⁴	57,10	0,91	32,7	0,47	1,02
Van den Berg, et al.	1,3x10 ⁻⁴	3,3x10 ⁻⁵	1,4x10 ⁻⁴	43,30	0,93	23,7	0,36	0,92
Tomasella et al. 00	5,1x10 ⁻³	5,7x10 ⁻⁴	4,8x10 ⁻³	43,60	0,94	11,8	0,61	0,98
Hodnett et al.	1,1x10 ⁻⁴	1,1x10 ⁻⁵	1,0x10 ⁻⁴	48,50	0,97	11,2	0,67	1,01
Tomasella et al. 03	1,5x10 ⁻⁴	1,1x10 ⁻⁵	1,5x10 ⁻⁴	18,10	0,40	7,3	0,03	0,29

^{*1}= Tomasella et al. (2000); ^{*2}= Tomasella et al. (2003); Variân. = variância dos dados; E. pepita = efeito pepita; r^{2*} = coeficiente de ajuste do modelo; GDE = grau de dependência espacial $[(C_0/C_0+C)*100]$; r^2 = coeficiente de determinação da validação cruzada; CR= coeficiente de regressão entre os valores medidos e determinados durante o processo de validação cruzada.

Quanto aos valores calculados de GDE, os dados ajustados de θ_{10} kPa apresentaram moderada dependência espacial (CAMBARDELLA et al., 1994) tendo sido bem capturada pelas FPTs de Vereecken et al.(1989) e Hodnett e Tomasella (2002). As demais FPTs apresentaram GDE < 25%, classificadas como forte dependência espacial. A FPT de Vereecken et al.(1989) apresentou o valor de GDE mais próximo ao encontrado para os dados medidos.

Pode-se observar na tab. 15, com relação aos parâmetros geoestatísticos calculados para 033kPa, que o patamar foi melhor estimado pela FPT de Tomasella et al. (2003) e mais fracamente estimado pela FPT de van den Berg et al. (1997), as quais estimaram 87,7% e 36,7% do patamar calculado para os dados ajustados de 033kPa. A FPT de Tomasella et al. (2000) superestimou o valor do patamar em 2,85 vezes, apresentando o pior desempenho entre todas as FPTs na estimativa deste parâmetro.

O alcance foi melhor estimado pelas FPTs de Vereecken et al. (1989) e Hodnett e Tomasella (2002), que estimaram 91,7% e 87,9% daquele valor, respectivamente. A pior estimativa foi da FPT de Tomasella et al. (2003), que estimou apenas 37% do valor do alcance calculado para os dados ajustados/medidos.

Os dados ajustados de 033kPa apresentaram moderada dependência espacial ($25\% < GDE \leq 75\%$) a qual foi capturada somente pelas FPTs de Vereecken et al. (1989) e Hodnett e Tomasella (2002). As demais FPTs apresentaram um forte grau de dependência espacial.

Com relação aos dados medidos e estimados de 01500kPa, observa-se na tab. 15 que as FPTs não tiveram um bom desempenho geral na estimativa do patamar. A FPT de Tomasella et al. (2000) superestimou o valor do patamar em 3,4 vezes, enquanto as demais FPTs só estimaram entre 7,1% e 10,7% deste valor.

O alcance foi fracamente estimado pelas FPTs, com a FPT de Tomasella et al. (2003) estimando 63,5% do valor calculado para os dados ajustados, enquanto as demais FPTs superestimaram estes valores em 51,9% e 100%.

Exceto a FPT de Vereecken et al. (1989) que apresentou moderada dependência espacial, todas as demais tiveram a mesma classificação dos dados ajustados de 01500kPa, como forte dependência espacial.

Os resultados da validação cruzada (tab. 15) mostram que, de uma maneira geral, para os conjuntos de dados medidos, o ajuste ao modelo esférico apresentou baixos valores para o coeficiente de determinação da validação cruzada (r^2), embora com valores do coeficiente de regressão (CR) próximos de 1,0. O desempenho mais fraco do ajuste ocorreu para os dados medidos de 01500kPa ($r^2 = 0,25$ e $CR = 0,74$), embora o ajuste tenha apresentado o menor valor da Soma dos Quadrados dos Resíduos, tenha atendido os critérios utilizados para seleção do modelo teórico, e,

coincidentemente foi também o modelo escolhido pelo auto-ajuste do programa utilizado (GS+).

Entre as FPTs, exceto para os valores estimados pela FPT de Tomasella et al. (2003), as demais FPTs apresentaram valores do coeficiente de regressão próximos de 1,0, indicando que a reta de regressão entre os valores reais (estimados pelas FPTs) e estimados pela krigagem, foi bem ajustada a reta 1:1. A FPT de Vereecken et al. (1989) apresentou o mais baixo valor de r^2 (0,23) para o semivariograma estimando dos valores de 033kPa, enquanto o maior valor de r^2 (0,67) foi obtido pela FPT de Hodnett e Tomasella (2002) para 01500kPa.

Os resultados da validação cruzada (tab. 15) indicam que o semivariograma ajustado para os dados medidos (ajustados) de 010kPa ($r^2 = 0,23$ e CR = 0,98) e 033kPa ($r^2 = 0,29$ e CR = 0,97) foram descritos de uma maneira mais adequada pelos semivariogramas ajustados pela FPT proposta por Vereecken et al.(1989), nos quais os valores do coeficiente r^2 e CR foram mais próximos dos determinados para os dados medidos quando comparados as demais FPTs. Para o semivariograma ajustado para os dados medidos (ajustados) de 01500kPa ($r^2 = 0,25$ e CR = 0,74) nenhuma das FPTs apresentou valores semelhantes.

Analisando-se os semivariogramas isotrópicos experimentais e teóricos (modelo esférico) para os dados ajustados/medidos de 010kPa, 033kPa e 01500kPa e estimados pelas FPTs avaliadas neste estudo (Fig. 22) pode-se constatar que as FPTs desenvolvidas por Vereecken et al. (1989) e Hodnett e Tomasella (2002) são as que melhor capturaram tanto o semivariograma experimental como o teórico dos valores medidos de 010kPa quando comparadas com as demais FPTs.

A melhor estimativa pela FPT de Vereecken et al. dos parâmetros geoestatísticos alcance, GDE, e índices da Validação Cruzada, r^2 e CR (tab. 15), podem ser os indicativos desta forte similaridade entre os semivariogramas. A FPT de Hodnett e Tomasella, embora não tenham apresentado resultados muito semelhantes para os índices da Validação Cruzada, r^2 e CR, em relação aos valores ajustados, apresentaram a segunda melhor estimativa (depois da FPT de Vereecken et al.) dos parâmetros alcance e GDE.

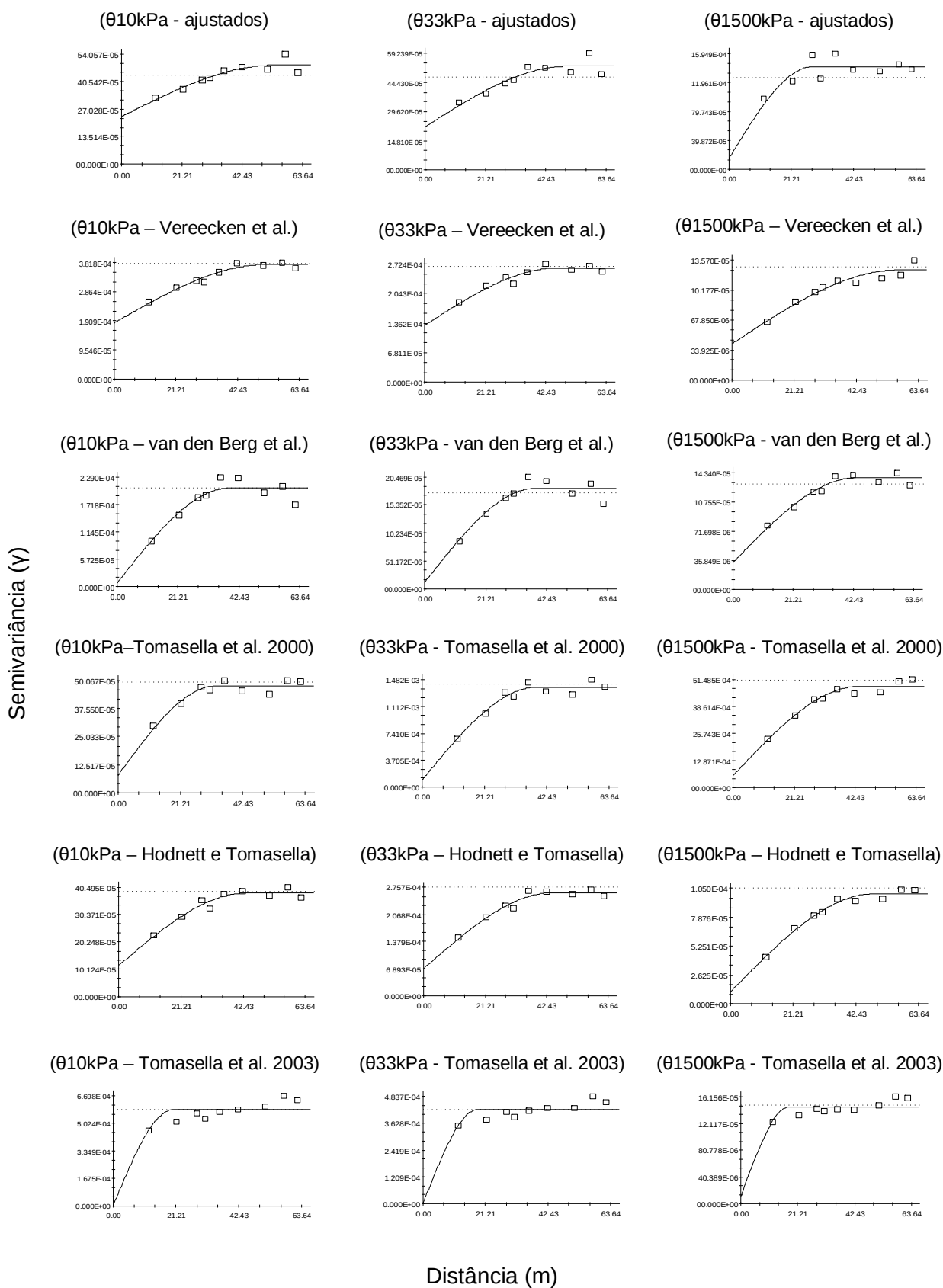


Figura 22 - Semivariogramas teóricos e experimentais (modelo esférico) para os valores ajustados de $\theta_{10\text{kPa}}$, $\theta_{33\text{kPa}}$ e $\theta_{1500\text{kPa}}$ e estimados pelas FPTs avaliadas.

Ainda da observação da Fig. 22 é possível identificar que os semivariogramas elaborados para os valores de $\theta 33\text{kPa}$ estimados pelas FPTs de Vereecken et al. (1989) e Hodnett e Tomasella (2002) são os que apresentam maior semelhança com o semivariograma dos valores ajustados de $\theta 33\text{kPa}$, a exemplo do que havia sido para $\theta 10\text{kPa}$. Novamente verifica-se que os valores do patamar e do GDE (tab. 15) obtido para as duas FPTs são similares aos valores encontrados para estes parâmetros na análise do conjunto de dados ajustados de $\theta 33\text{kPa}$, e também para os índices da validação cruzada (r^2 e CR), com a FPT de Vereecken et al. estimando melhor estes valores do que a FPT de Hodnett e Tomasella. Isto parece ser um forte indicativo da importância destes dois parâmetros (alcance e GDE) quando são comparados semivariogramas.

Nielsen e Wendroth (2003, p. 109-110) relatam que para a krigagem, o importante no semivariograma é que represente adequadamente o variograma em distâncias (lags) dentro do alcance, isto é, para a parte do semivariograma que reflete a dependência espacial. Assim, parece claro que o alcance e o Grau de Dependência Espacial (GDE) possam ser usados como critério de comparação entre semivariogramas, visto que este último, representando a relação entre o efeito pepita e a semivariância total, esta definindo também o patamar.

Os valores de r^2 e CR do procedimento da validação cruzada também influenciam na definição da similaridade entre os semivariogramas, entretanto parece haver a necessidade de que, aliado a semelhança entre estes dois índices nos semivariogramas que estão sendo comparado, também haver semelhança entre o alcance e o GDE. Esta consideração pode ser melhor explicitada quando observa-se, por exemplo, na tab. 15, os valores de r^2 e CR da validação cruzada obtidos para as FPTs de Vereecken et al., Tomasella et al.(2000) e Hodnett e Tomasella para $\theta 10\text{kPa}$. Os valores de r^2 para as três FPTs são de 0,25, 0,39 e 0,39, respectivamente, e, entretanto o semivariograma obtido para a FPT de Tomasella et al. (2000) não apresenta semelhança com o semivariograma dos dados ajustados.

Com relação ao valor do coeficiente de regressão da validação cruzada (CR), para as mesmas FPTs e $\theta 10\text{kPa}$, os valores são 0,89, 0,88 e 0,93 para as FPTs de Vereecken et al., Tomasella et al.(2000) e Hodnett e Tomasella, respectivamente, e novamente o semivariograma obtido para a FPT de Tomasella et al. (2000) não apresenta semelhança com o semivariograma dos dados ajustados. Finalmente, o que diferencia o semivariograma da FPT de Tomasella et al. (2000) do

semivariograma obtido pelas outras duas FPTs em questão e, obviamente, do semivariograma dos dados ajustados, são os parâmetros alcance e GDE. Isto parece confirmar a observação feita anteriormente, de que a análise de semelhança entre semivariogramas deva ser feita considerando-se integradamente o alcance, o GDE e os índices da validação cruzada, r^2 e CR.

Com relação aos semivariogramas obtidos para o conjunto de valores ajustados de 01500kPa e estimados pelas FPTs (Fig. 22) pode-se observar que nenhuma das FPTs ajustou um semivariograma semelhante ao obtido para os dados ajustados de 01500kPa.

Embora as FPTs de Tomasella et al. (2000) e Hodnett e Tomasella (2002) tenham apresentado valor do GDE semelhante ao dos dados ajustados (tab. 15), não capturaram o alcance nem os valores de r^2 e CR do procedimento da validação cruzada, o que, conforme discutido anteriormente, não seria suficiente para apresentar similaridade nos semivariogramas teórico e experimental ajustado aos dados medidos/ajustados.

A Fig. 23 apresenta os mapas de contorno construídos a partir dos conjuntos de dados medidos/ajustados de 010kPa e 033kPa e estimados pelas FPTs de Vereecken et al. (1989) e Hodnett e Tomasella (2002) as quais apresentaram semelhança nos semivariogramas gerados, em relação aos obtidos para os dados ajustados.

Pode-se constatar que os mapas gerados a partir dos valores estimados pelas FPTs não são similares aos mapas dos valores medidos/ajustados de 010kPa e 033kPa.

Observa-se que os mapas gerados pelas duas FPTs apresentam algum grau de similaridade entre seus semivariogramas. Ambas apresentam uma concentração dos valores mais baixos de 010kPa a partir da distância de 70m no eixo horizontal, e concentram valores mais altos em algumas áreas centrais.

Para 033kPa mostram a mesma tendência, com valores mais baixos a direita da figura e quatro áreas com valores mais altos de 033kPa distribuídas com alguma simetria.

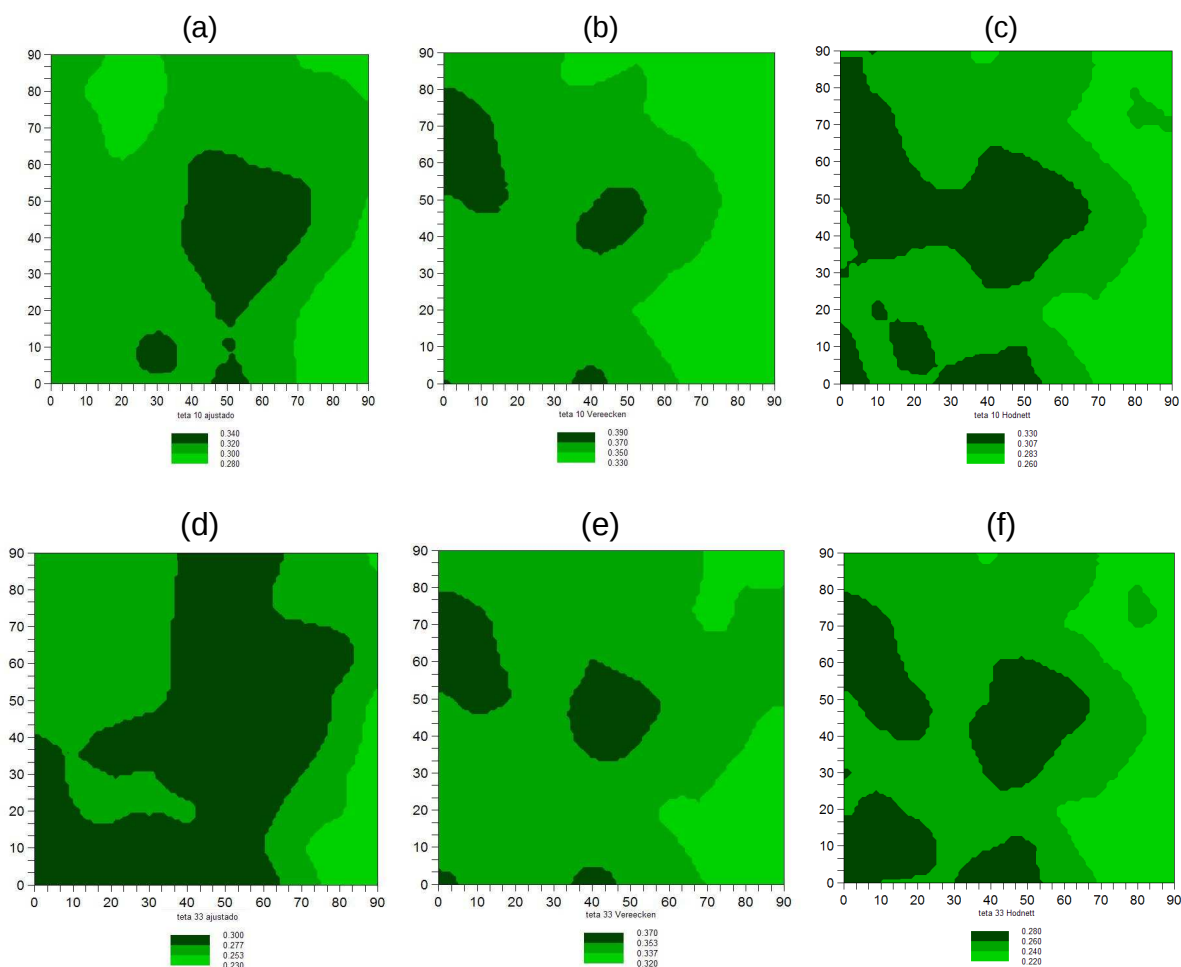


Figura 23 – Mapas de contorno para os dados de $\theta_{10\text{kPa}}$ ajustados (a) e estimados pelas FPTs de Vereecken et al. (1989) (b) e Hodnett e Tomasella (2002) (c) e os dados de $\theta_{33\text{kPa}}$ ajustados (d) e estimados pelas FPTs de Vereecken et al. (1989) (e) e Hodnett e Tomasella (2002) (f).

Embora a diferença nas faixas de valores para $\theta_{10\text{kPa}}$ e $\theta_{33\text{kPa}}$ entre os dados ajustados e estimados pelas FPTs, no mapa dos dados observados também há a tendência de concentração dos valores mais baixos de $\theta_{10\text{kPa}}$ e $\theta_{33\text{kPa}}$ no lado direito da figura. Os valores ajustados de $\theta_{10\text{kPa}}$ variaram entre $0,2665 - 0,3870\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$, e para as FPTs de Vereecken et al. (1989) e Hodnett e Tomasella (2002) variaram entre $0,3202 - 0,4176\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ e $0,2577 - 0,3503\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$, respectivamente, o que faz com que as amplitudes de variação sejam diferentes e, por consequência, as três faixa de valores delimitadas nos mapas também o são. Embora o objetivo seja identificar o padrão de distribuição dos valores de $\theta_{10\text{kPa}}$ e $\theta_{33\text{kPa}}$ na área, estas diferenças na amplitude de cada faixa dificultam uma análise mais acurada.

8.4 Conclusões

Os valores da retenção de água no solo foram melhor estimados pelas FPT de Vereecken et al. (1989) para as tensões de 0kPa (saturação) e 1kPa, pela FPT de Hodnett e Tomasella (2002) para as tensões de 6, 10, 33 e 100kPa, e finalmente, para a tensão de 1500kPa pela FPT de Vereecken et al. (1989).

Na avaliação do desempenho das FPTs considerando toda a curva de retenção, as FPTs de Vereecken et al. (1989) e Hodnett e Tomasella (2002) apresentaram os menores valores de ME, $0,0247\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$ e $-0,0249\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$, respectivamente.

Para os valores de $\theta_{1500\text{kPa}}$ houve uma tendência das FPTs em estimar um valor constante para esta variável.

As FPTs desenvolvidas por Vereecken et al. (1989) e Hodnett e Tomasella (2002) capturaram bem tanto o semivariograma experimental como o teórico dos valores medidos de $\theta_{10\text{kPa}}$ e de $\theta_{33\text{kPa}}$ quando comparadas com as demais FPTs.

Nenhuma das FPTs testadas apresentou parâmetros geoestatísticos semelhantes aos obtidos para os dados ajustados de $\theta_{1500\text{kPa}}$.

8.5 Referências

- BORGESSEN, C. D.; SCHAAP, M. G. Point and parameter pedotransfer functions for water retention predictions for Danish soils. **Geoderma** v.127, p.154-167, 2005.
- BOUMA, J. Using soil survey data for quantitative land evaluation. In: STEWART, B.A., ed. **Advances in soil science**. New York, Springer Verlag. v.9, p.177- 213, 1989.
- CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEM, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPA, A. E. Field scale variability of soil properties in central Iowa soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.47, p.1501-1511, 1994.
- CAMPBELL, G. S. A simple method for determining unsaturated hydraulic conductivity from moisture retention data. **Soil Science**, v.117, p.311–314, 1974.
- CORNELIS, W. M., J. RONSYN, M. Van MEIRVENNE, AND R. HARTMANN. Evaluation of pedotransfer functions for predicting the soil moisture retention curve. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.65, p.638–648, 2001.

DONATELLI, M.; WÖSTEN, J. H. M.; BELOCCHI, G. Evaluation of pedotransfer functions. In: Pachepsky, Y.A., Rawls, W.J. (Eds.), **Development of Pedotransfer Functions in Soil Hydrology**. Elsevier Science, Amsterdam. p.357–363. 2004.

DOURADO-NETO, D.; NIELSEN, D.; HOPMANS, J. W.; REICHARDT, K.; BACCHI, O. O. S.; LOPES, P. P. **Soil water retention curve**, SWRC software (version 3.0 beta) Piracicaba, SP, Brasil, 2001. CD-ROM.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 2ª ed. Rio de Janeiro, 1997. 212 pp.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro, Embrapa Solos, Brasília, 2006. 306p.

GAMMA DESIGN SOFTWARE. GS+: version 7.0. Geostatistics for the Environmental Sciences. Plainwell: **Gamma Design Software**, 2004. CD-ROM.

GEE, G. W.; BAUDER, J. W. Particle size analysis. In: Klute A. (ed), Methods of soil Analysis, Part I, Monograph **American Society of Agronomy**, Madison, v.15, p.383-411, 1986.

GOMES, N. M.; SILVA, A. M.; MELLO, C. R.; FARIA, M. A.; OLIVEIRA, P. M. Metodos de ajuste e modelos de semivariograma aplicados ao estudo da variabilidade especial de atributos físico-hídricos do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.435-443, 2007.

HERBST, M.; DIEKKRÜGER, B.; VEREECKEN, H. Geostatistical co-regionalization of soil hydraulic properties in a micro-scale catchment using terrain attributes. **Geoderma** v.132, p.206-221, 2006.

HODNETT, M.G. & TOMASELLA, J. Marked differences between van Genuchten soil water-retention parameters for temperate and tropical soils: A new water-retention pedo-transfer functions developed for tropical soils. **Geoderma**, v.108, p.155-180, 2002.

JOURNEL, A. G.; HUIJBREGTS, C. H. J. **Mining geoestatics**. New York: Academic Press Inc., 1978. 600p.

MCBRATNEY, A.B., MINASNY, B., CATTLE, S.R., VERVOORT, R.W. From pedotransfer functions to soil inference systems. **Geoderma** v.109, p.41-73, 2002.

MINASNY, B. & MCBRATNEY, A. B. The efficiency of various approaches to obtaining estimatives of soil hydraulic properties. **Geoderma**, v.107, p.55-70, 2002.

MINASNY, B.; MCBRATNEY, A.B. & BRISTOW, K. Comparison of different approaches to the development of pedotransfer functions for water-retention curves. **Geoderma**, v.93, p.225-253, 1999.

MINITAB 14. MINITAB Statistical Software, Release 14 for Windows, State College, Pennsylvania. **Minitab Inc.** 2003. CD-ROM.

MUALEM, Y. A new model predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. **Water Resources Researches**, v.12, p.513–522, 1976.

NEMES, A.; SCHAAP, M. G.; WÖSTEN, J. H. M. Functional evaluation of pedotransfer functions derived from different scales of data collection. **Soil Science Society of America Journal**, v.67, p.1093-1102, 2003.

OLIVEIRA L. B.; RIBEIRO M. R.; JACOMINE P. K. T.; RODRIGUES, J. V. V.; MARQUES, F. A. Funções de Pedotransferência para predição da umidade retida a potenciais específicos em solos do Estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, p.315-323, 2002.

RAWLS, W.J., AND D.L. BRAKENSIEK. Prediction of soil water properties for hydrologic modeling. p. 293–299. In E.B. Jones and T.J.Ward (ed.) **Watershed Management in the Eighties**. Proc. Irrig. Drain. Div., ASCE, New York. 1985.

ROMANO, N., CHIRICO, G. B. The role of terrain analysis is using and developing pedotransfer functions. In: Pachepsky, Y.A., Rawls, W.J. (Eds.), **Development of Pedotransfer Functions in Soil Hydrology**. Elsevier Science, Amsterdam. p.273–294, 2004.

ROMANO, N., SANTINI, A. Effectiveness of using pedo-transfer functions to quantify the spatial variability of soil water retention characteristics. **Journal of Hydrology, Amsterdam**, v.202, p.137–157, 1997.

ROMANO, N., Spatial structure of PTF estimates. In: Pachepsky, Y.A., Rawls, W.J. (Eds.), **Development of Pedotransfer Functions in Soil Hydrology**. Elsevier Science, Amsterdam, p.295–348. 2004.

SAXTON, K. E.; RAWLS, W. J.; ROMBERGER, J. S.; PAPENDICK, R.I. Estimating generalized soil water characteristics from texture. **Soil Science Society of America Journal**, v.50, p.1031–1036, 1986.

SCHAAP, M. G.; NEMES, A.; van GENUCHTEN, M. Th. Comparison of models for indirect estimation of water retention and available water in surface soils. **Vadose Zone Journal**. Madison, v.3, p.1455-1463, 2004.

SCHEINOST, A. C.; SINOWSKI, W.; AUERSWALD, K. Regionalization of soil water retention curves in a highly variable soilscape: I developing new pedotransfer function. **Geoderma**, v.78, p.129–143, 1997.

SINOWSKI, W.; SCHEINOST, A. C.; AUERSWALD, K. Regionalization of soil water retention curves in a highly variable soilscape, II. Comparision of regionalization procedures using a pedotransfer functions. **Geoderma**, v.78, p.145-159, 1997.

TEDESCO, M.J., GIANELLO, C., BISSANI, C.A., BOHNEN, H. & VOLKWEISS, S.J. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2a ed. revisada e ampliada. Porto Alegre: Faculdade de Agronomia. UFRGS, 1995. 174p. (Boletim Técnico, 5).

TIETJE, O.; TAPKENHINRICHS, M. Evaluation of Pedotransfer functions. **Soil Science Society America Journal**, v.57, p.1088–1095, 1993.

TOMASELLA, J.; HODNETT, M.G. & ROSSATO, L. Pedotransfer functions for the estimation of soil water retention in Brazilian soils. **Soil Science Society America Journal**, v.64, p.327- 338, 2000.

TOMASELLA, J.; HOODNETT, M. G.. Estimating soil water characteristics from limited data in Brazilian Amazonia. **Soil Science, Baltimore**, MD, v.163, p.190- 202, 1998.

TOMASELLA, J.; PACHEPSKY, Y.; CRESTANA, S.; RAWLS, J.W. Comparison of Two Techniques to Develop Pedotransfer Functions for Water Retention. **Soil Science Society of America Journal, Madison**, v.67, p.1085-1092, 2003.

van den BERG, M.; KLAMT, E.; REEUWIJK, L. P. V.; SOMBROEK, W. G. Pedotransfer functions for the estimation of moisture characteristics of Ferralsols and related soils. **Geoderma**, v.78, p.161-180, 1997.

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.

van GENUCHTEN, M. TH.; LEIJ, F. J.; YATES, S. R. **The RETC code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils**. EPA/600/2-91/065. R.S. Kerr Environmental Research Laboratory, US Environmental Protection Agency, Ada, OK, USA, 1991. 93 p.

VEREECKEN, H.; FEYEN, J.; MAES, J. Estimating the soil moisture retention characteristic from texture, bulk density and carbon content. **Soil Science** v.148, p.389–403. 1989.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R.F., ALVAREZ, V.H. & SCHAEFER, C.E.G.R. (Eds.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.1, p.1-54, 2000.

WILLIAMS, J.; ROSS, P. J.; BRISTOW, K. L. Prediction of the Campbell water retention function from texture, structure and organic matter. In: **Proceedings of an International Workshop on Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils** (eds M.T.h. van Genuchten, F.J. Leij & L.J. Lund), University of California, Riverside, CA, USA, p.427–441, 1992.

WÖSTEN, J. H. M. Pedotransfer functions to evaluate soil quality. In: Gregorich, E. G., Carter, M. R. Eds. **Soil Quality for Crop Production and Ecosystem Health**. Developments in Soil Science, Elsevier, v.25, p. 221–245, 1997.

WÖSTEN, J. H. M.; PACHEPSKY, YA. A.; RAWLS, W. J. Pedotransfer functions: bridging the gap between available basic soil data and missing hydraulic characteristics. **Journal of Hydrology**, v.251, p.123–150, 2001.

9 CONCLUSÕES FINAIS

As Funções de Pedotransferência pontuais, que estimam o conteúdo gravimétrico ou volumétrico de água retida no solo, avaliadas neste trabalho, demonstraram limitada capacidade de aplicação aos solos de várzea estudados.

Nenhuma das Funções de Pedotransferência pontuais apresentou desempenho eficiente de estimativa da retenção de água quando avaliadas para ambas as tensões, relacionadas a capacidade de campo e ao ponto de murcha permanente.

Embora as Funções de Pedotransferência pontuais utilizadas neste estudo não tenham eficientemente expressado a estrutura de variabilidade espacial da retenção de água nos solos de várzea testados, identificou-se promissor potencial de utilização desta ferramenta diante da possibilidade de desenvolver Funções de Pedotransferência que possam ser validadas para os solos de várzea do Rio Grande do Sul.

As Funções de Pedotransferência paramétricas avaliadas neste estudo não apresentaram eficiente desempenho de estimativa da curva de retenção de água nos solos de várzea testados.

Para determinados pontos da curva de retenção de água houve eficiente desempenho de estimativa dos valores medidos por duas das cinco Funções de Pedotransferência paramétricas avaliadas.

Com relação ao potencial de descrever a estrutura de variabilidade espacial do conjunto de dados medidos, as FPTs desenvolvidas por Vereecken et al. (1989) e Hodnett e Tomasella (2002) capturaram bem tanto o semivariograma experimental como o teórico dos valores medidos de $\theta_{10\text{kPa}}$ e de $\theta_{33\text{kPa}}$.

10 REFERÊNCIAS

ARRUDA, F.B.; ZULLO Jr., J. & OLIVEIRA, J.B. Parâmetros de solo para o cálculo da água disponível com base na textura do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.11, p.11-15, 1987.

ARYA, L.M.; PARIS, J.F. A physicoempirical model to predict the soil moisture characteristic from particle-size distribution and bulk density data. **Soil Science Society of America Journal**, v.45, p.1023-1030, 1981.

BABALOA, O. Spatial variability of soil water properties in tropical soils of Nigeria. **Soil Science**, n.126, v.5, p.269-279, 1978.

BOUMA, J. Using soil survey data for quantitative land evaluation. **Advances in Soil Science, New York**, v. 9, p.177-213, 1989.

BOUMA, J.; van LANEN, J. A. J. Transfer functions and threshold values: From soil characteristics to land qualities. In: **Quantified land evaluation**. K. J. Beek et al. (Eds). Earth Science Publications N.6 ITC Publ. Enschede. Netherlands, p.106-110. 1987.

BOUWMAN, A. F.; FUNG, I.; MATTHEWS, E.; JOHN, J. Global analysis of the potential for N₂O production in natural soils. **Global Biogeochem. Cycles**, v.7, p.557-597, 1994.

De JONG, R., CAMPBELL, C. A.; NICHOLAICHUK, W. Water retention equations and their relationship to soil organic matter and particle size distributions for disturbed samples. **Canadian Journal of Soil Science**, v.63, p.291-302, 1983.

DOURADO-NETO, D.; NIELSEN, D.; HOPMANS, J. W.; REICHARDT, K.; BACCHI, O. O. S.; LOPES, P. P. **Soil water retention curve**, SWRC software (version 3.0 beta) Piracicaba, SP, Brasil, 2001.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 2ª ed. Rio de Janeiro, 1997. 212 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro, Embrapa Solos, Brasília, 2006. 306p.

GAMMA DESIGN SOFTWARE. GS+: version 7.0. Geostatistics for the Environmental Sciences. Plainwell: **Gamma Design Software**, 2004. CD-ROM.

GEE, G. W.; BAUDER, J. W. Particle size analysis. In: Klute A. (ed), **Methods of soil Analysis**, Part I, Monograph 15. American Society of Agronomy, Madison. p.383-411, 1986.

ENTEKHABI, D.; RODRIGUEZ-ITURBE, I.; CASTELLI, F. Mutual interactions of soil moisture state and atmospheric processes. **Journal Hydrology**, v.184, p.3-17, 1995.

GOOVAERTS, P. Geostatistical tools for characterizing the spatial variability of microbiological and physico-chemical soils properties. **Biol. Fertil. Soils**, n.27, p.315-334, 1998.

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

HERBST, M.; DIEKKRÜGER, B.; VEREECKEN, H. Geostatistical co-regionalization of soil hydraulic properties in a micro-scale catchment using terrain attributes. **Geoderma**, v.132, p.206-221, 2006.

HODNETT, M.G. & TOMASELLA, J. Marked differences between van Genuchten soil water-retention parameters for temperate and tropical soils: A new water-retention pedo-transfer functions developed for tropical soils. **Geoderma**, v.108, p.155-180, 2002.

ISAAKS, E.H.; SRIVASTAVA, R.M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University Press, 1989. 561p.

JOURNEL, A. G.; HUIJBREGTS, C. H. J. **Mining geoestatics**. New York: Academic Press Inc., 1978. 600p.

KEMPER, W.D.; ROSENAU, R.C. Aggregate Stability and Size Distribution. In: KLUTE, A. **Methods of Soil Analysis**. 2.ed., Madison: American Society of Agronomy, p. 425-442, 1986.

MACHADO, A.; CONCEIÇÃO, A. R. **Programa estatístico WinStat Sistema de Análise Estatístico para Windows**. Versão 2.0. Pelotas: UFPel, 2002. CD-ROM.

MAYR, T., JARVIS, N.J., Pedotransfer functions to estimate soil water retention parameters for a modified Brooks– Corey type model. **Geoderma, Amsterdam**, v.91, p.1-9, 1999.

MCBRATNEY, A. B., MINASNY, B., CATTLE, S. R., VERVOORT, R. W. From pedotransfer functions to soil inference systems. **Geoderma, Amsterdam**, v.109, p. 41-73, 2002.

MILLY, P. C. D.; DUNNE, K. A. The sensitivity of the global water cycle to the water holding capacity of the land. **Journal Climate**, v.7, p.506–526, 1994.

MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B. Evaluation and development of hydraulic conductivity pedotransfer functions for Australian soil. **Australian Journal of Soil Research**, v.38, p. 905-926, 2000.

MINASNY, B.; MCBRATNEY, A.; 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, (Documentos, 45). 2003. 50p.

MINITAB 14. MINITAB Statistical Software, Release 14 for Windows, State College, Pennsylvania. **Minitab Inc.** 2003. CD-ROM.

NEMES, A.; RAWLS, W. J., Soil texture and particle-size distribution as input to estimate soil hydraulic properties. In: **Development of pedotransfer functions in soil hydrology**. Y. A. Pachepsky & W. J. Rawls (Eds). Elsevier, Amsterdam, p.47-70, 2004.

NIELSEN, D. R.; WENDROTH, O. **Spatial and temporal statistics: Sampling field soil and their vegetation**. Reiskirchen: Catena Verlag, 2003. 398 p.

OLIVEIRA L. B.; RIBEIRO M. R.; JACOMINE P. K. T.; RODRIGUES, J. V. V.; MARQUES, F. A. Funções de Pedotransferência para predição da umidade retida a potenciais específicos em solos do Estado de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, p.315-323, 2002.

PACHEPSKY, YA.A., RAWLS, W.J., Development of pedotransfer functions in soil hydrology. Y. A. Pachepsky & W. J. Rawls (Eds). **Elsevier, Amsterdam**. p.vii-xiv. 2004.

PALMEIRA, P. R. T.; PAULETTO, E. A.; TEIXEIRA, C. F. A.; GOMES, A. da S.; SILVA, J. B. Estabilidade de agregados de um Planossolo sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p.189-295, 1999.

RAJKAI, K., KABOS, S., van GENUCHTEN, M.Th., JANSSON, P.E., Estimation of water retention characteristics from the bulk density and particle-size distribution of Swedish soils. **Soil Science**, v.161, p.832–845, 1996.

RAJKAI, K.; KABOS, S.; van GENUCHTEN, M. Th. Estimating the water retention curve from soil properties: comparison of linear, nonlinear and concomitant variable methods. **Soil Tillage Research**. v.79, p.145-152, 2004.

RAWLS, W.J., AND D.L. BRAKENSIEK. Prediction of soil water properties for hydrologic modeling. p. 293–299. In E.B. Jones and T.J.Ward (ed.) **Watershed Management in the Eighties**. Proc. Irrig. Drain. Div., ASCE, New York, 1985.

RAWLS, W.J., D.L. BRAKENSIEK,; K.E. SAXTON. Estimation of soil water properties. **Trans. American Society of Agronomy**, v.25, p.1316–1320, 1982.

REICHARDT, K.; TIMM, L.C. **Solo, Planta e Atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. São Paulo: Editora Manole, 2004. 478p.

ROMANO, N., SANTINI, A. Effectiveness of using pedo-transfer functions to quantify the spatial variability of soil water retention characteristics. **Journal of Hydrology, Amsterdam**, v. 202, p. 137–157, 1997.

ROMANO, N., Spatial structure of PTF estimates. In: Pachepsky, Y.A., Rawls, W.J. (Eds.), **Development of Pedotransfer Functions in Soil Hydrology**. Elsevier Science, Amsterdam, p.295–348, 2004.

ROQUE, M. W.; SILVA, E. L.; MATSURA, E. E. Análisis comparativo de la dependencia espacial de las propiedades físicas-hídricas em suelos a lo largo de un transecto perpendicular a un drenaje natural. **Estúdios em la zona non saturada Del suelo**, v.7, p.229-233, 2005.

RUSSO, D.; BRESLER, E. Soil hydraulic properties as stochastic processes: I. Na analysys of Field spatial variability. **Soil Science Society of America Journal**, n.45, v.4, p.682-687, 1981.

SAXTON, K.E.; RAWLS, W.J.; ROMBERGER, J.S.; PADENDICK, R.I., Estimating generalized soil-water characteristics from texture. **Soil Science Society of America Journal**, v.50, p.1031-1036, 1986,

SCHEINOST, A. C.; SINOWSKI, W.; AUERSWALD, K. Regionalization of soil water retention curves in a highly variable soilscape, I. Developing a new pedotransfer function. **Geoderma, Amsterdam**, v.78, p.129-143, 1997.

SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; FIDALSKI, J.; IMHOFF, S. Funções de Pedotransferência para as curvas de retenção de água e de resistência do solo à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.1-10, 2008.

SINOWSKI, W.; SCHEINOST, A. C.; AUERSWALD, K. Regionalization of soil water retention curves in a highly variable soilscape, II. Comparision of regionalization procedures using a pedotransfer functions. **Geoderma**, v.78, p.145-159, 1997.

SOLANO, P. J. E. **Retenção de água e pedofunções para solos do Rio Grande do Sul**. 2003, 117f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo)- Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

TEDESCO, M.J., GIANELLO, C., BISSANI, C.A., BOHNEN, H. & VOLKWEISS, S.J. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2a ed. revisada e ampliada. Porto Alegre: Faculdade de Agronomia. UFRGS, 1995. 174p. (Boletim Técnico, 5).

TIETJE, O.; TAPKENHINRICHS, M. Evaluation of pedo-transfer functions. **Soil Science Society of America Journal, Madison**, WI, v.57, p.1088-1095, 1993.

TOMASELLA, J.; HOODNETT, M. G.. Estimating soil water characteristics from limited data in Brazilian Amazonia. **Soil Science**, Baltimore, MD, v.163, p.190- 202, 1998.

TOMASELLA, J., M. G. HODNETT, L. ROSSATO. Pedotransfer functions for the estimation of soil water retention in Brazilian soils. **Soil Science Society of America Journal, Madison**, v.64, p.327–338, 2000.

TOMASELLA, J.; PACHEPSKY, Y.; CRESTANA, S.; RAWLS, J.W. Comparison of Two Techniques to Develop Pedotransfer Functions for Water Retention. **Soil Science Society of America Journal, Madison**, v. 67, p.1085-1092, 2003.

UNGARO, F., CALZOLARI, C.. Using existing soil databases for estimating water-retention properties for soils of the Pianura Padano–Veneta region of North Italy. **Geoderma** v.99, p.99-121, 2001.

UNGARO, F.; CALZOLARI, C.; BUSONI, E. Development of pedotransfer functions using a group method of data handling for the soil of the Pianura Padano-Veneta region of North Italy: water retention properties. **Geoderma**, v.124, p.293-317, 2005.

URACH, F. L. **Estimativa da retenção de água em solos para fins de irrigação**. 2007, 78f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo)- Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.

Van den BERG, M.; KLAMT, E.; van REEUWIJK, L. P.; Sombroek, W. G. Pedotransfer functions for the estimation of moisture retention characteristics of Ferralsols and related soils. **Geoderma, Amsterdam**, v.78, p.161-180, 1997.

Van GENUCHTEN, M.Th. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.44, p.892-897, 1980.

VEREECKEN, H. Estimating the unsaturated hydraulic conductivity from theoretical models using simple soil properties. **Geoderma**, v.65, p.81-92, 1995.

VEREECKEN, H., FEYEN, J., MAES, J. Estimating the soil moisture retention characteristic from texture, bulk density and carbon content. **Soil Science**, v.148, p.389–403, 1989.

VIEIRA, S.R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H. & SCHAEFER, C.E.G.R. (Eds.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.1, p.1-54, 2000.

WÖSTEN, J. H. M.; BOUMA, J.; STOFFELSEN, G. H. Use of soil survey data for regional soil water simulations models. **Soil Science of América Journal**, v.49, p.1238-1244, 1985.

WÖSTEN, J. H. M.; FINKE, P. A.; JANSEN, M. J. W. Comparison of class and continuous pedotransfer functions to generate soil hydraulic characteristics. **Geoderma, Amsterdam**, v.66, p.227-237, 1995.

WÖSTEN, J. H. M.; PACHEPSKY, Y. A., RAWLS, W.J. Pedotransfer functions: bridging gap between available basic soil data and missing soil hydraulic characteristics. **Journal of Hydrology, Amsterdam**, v.251, p.23-150, 2001.

APÊNDICES

APÊNDICE A

Descrição morfológica do perfil da área relativamente alta

Perfil: Planossolo descrito no município de Capão do Leão – RS

Data: 28/3/2007

Classificação: PLANOSSOLO HÁPLICO Eutrófico gleissólico

Localização:

Altitude: 13 m.

Situação, declividade e cobertura vegetal: trincheira em área plana com solo descoberto.

Formação geológica e litologia:

Material originário: sedimentos originados de rochas graníticas

Rochosidade: não rochoso

Pedregosidade: não pedregoso

Relevo local: plano

Relevo regional: plano, suave ondulado a ondulado

Drenagem: imperfeitamente drenado

Erosão:

Vegetação primária: gramíneas

Uso atual: talhões em culturas anuais

Descrito por: Luis Fernando Spinelli Pinto, José Maria Barbat Parfitt, Conceição Lagos de Ávila, Samira Jaber Suliman Audeh,.

Características morfológicas

A	0 – 20/33 cm; bruno-acinzentado-muito-escuro a bruno-acinzentado-escuro (10YR 3,5/2, úmido), cinzento-brunado-claro (10YR 6/2 seco); franca; fraca blocos subangulares pequena; friável, ligeiramente plástica a plástica e ligeiramente pegajosa; transição irregular e clara.
AE	20/33 – 30/40 cm; bruno-acinzentado-escuro (10YR 4/2, úmido), cinzento a cinzento claro (10YR 6,5/1 seco); franco argiloso; maciça que se desfaz em blocos angulares pequenos e médios; friável, ligeiramente plástica a plástica, ligeiramente pegajosa a pegajosa; transição irregular e clara.
E	30/40 – 60/75 cm; cinzento-escuro a bruno-acinzentado-escuro (10YR 4/1,5, úmido), cinzento claro (10YR 7/1 seco); franco argilo arenoso; aspecto de maciça blocos angulares e subangulares pequenos; friável, plástica e ligeiramente pegajosa a pegajosa; transição irregular e plana.
BE/E	60/75 – 70/90 cm; coloração variegada composta por bruno-acinzentado-escuro (10YR 4/2, úmido), acinzentado-muito-escuro a acinzentado-escuro (10YR 3,5/1, úmido), cinzento-brunado-claro (10YR 6/2, seco), cinzento-escuro (10YR 4/1, seco); mosqueados comuns pequenos e médios distintos bruno (10YR 4/4, úmido), bruno-amarelado (10YR 5/8, seco); argiloso; moderado blocos angulares médios; firme, plástica e pegajosa; forte e comum; transição irregular e clara.
B ₁	70/90 – 1,03/1,18 cm; bruno-acinzentado-escuro a bruno-acinzentado (10YR 4,5/2, úmido) cinza claro (10YR 7/2, seco); mosqueados abundantes médios e grandes distintos amarelo-brunado (10YR 6/8, úmido e seco); argiloso; moderado blocos angulares médios; firme, plástica e pegajosa; forte e comum; transição irregular e clara.
B ₂	103/118 – 120/140 cm; coloração variegada composta por cinzento-brunado-claro (10YR 6/2, úmido) e cinzento-escuro (10YR 4,5/1, úmido) cinzento claro (10YR 7/2, seco), acinzentado (10YR 5,5/1, seco); mosqueado abundantes grandes e distintos amarelo-brunado (10YR 5/8, úmido) amarelo-brunado (10YR 6/8, seco); argiloso; moderado blocos angulares médios; firme, plástica e pegajosa; fraca e moderada; transição ondulada e clara.
BC	120/140 – 160/170 cm; coloração variegada composta por bruno-claro-acinzentado a bruno-muito claro-acinzentado (10YR 6,5/3, úmido) amarelo-brunado (10YR 6/8, úmido), claro-acinzentado (10YR 7/3, seco) e amarelo-brunado a amarelo (10 YR 6,5/8, seco); argiloso; moderado blocos angulares médios e grandes; friável, plástica e pegajosa; fraca e comum; transição ondulada e clara.
C	160/170 cm ⁺ ; cinzento-brunado-claro a cinzento claro (10YR 6,5/2, úmido) cinzentado-claro (10YR 7/2, seco); mosqueado amarelo-brunado (10YR 5/8, úmido) distinto comum; mosqueado amarelo-brunado a amarelo (10 YR 6,5/8, seco); argilo arenosa; maciço; firme, plástica e pegajosa; transição ondulada e clara.

OBS: Presença de bolsões de areia de 5 a 6 cm por 3 a 4 cm no B1, B2, BC e C.

Análises físicas e químicas

Horizonte		Granulometria (%)					Arg. disp. (%)	Textura	Silte/ Argila
Símbolo	Profundidade (cm)	Areia grossa	Areia fina	A. M. fina	Silte	Argila			
A	0 – 20/33	29,40	11,70	5,40	38,16	15,34	6,91	Franca	2,34
AE	20/33 – 30/40	29,30	12,50	6,40	37,38	14,42	8,62	Franca	2,56
E	30/40 – 60/75	25,90	11,30	6,00	40,30	16,50	11,14	Franca	2,31
BE/E	60/75 – 70/90	20,80	9,80	5,50	29,63	34,27	-	Franco argilosa	0,86
B1	70/90 – 103/118	16,80	9,00	5,50	30,59	38,11	-	Franco argilosa	0,80
B2	103/118 – 120/140	18,90	9,40	5,70	29,16	36,84	-	Franco argilosa	0,81
BC	120/140 – 160/170	18,60	10,00	6,20	27,17	38,03	-	Franco argilosa	0,71
C	160/170 cm ⁺ ;	19,30	10,50	5,90	50,35	13,95	-	Franco siltosa	3,61

A.M. Fina = areia muito fina; Arg. disp. = argila dispersa em água

Complexo sortivo

Horizonte	pH		Complexo Sortivo (cmol _c .dm ⁻³)				
	Água	KCl	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	S ⁺	K ⁺	Al ⁺⁺⁺
A	4,87	4,02	2,85	1,52	4,70	54,8	0,73
AE	4,63	3,71	1,18	0,96	2,36	14,5	1,46
E	4,83	3,61	1,49	1,42	3,22	15,5	1,32
BE/E	4,81	3,44	3,58	3,48	7,72	36,2	2,10
B1	4,94	3,45	4,71	4,78	10,27	46,5	1,69
B2	5,07	3,61	4,77	4,77	10,35	49,6	1,09
BC	5,25	3,74	4,82	4,82	10,38	45,5	0,73
C	5,42	3,98	5,16	4,99	10,90	47,5	0,55

Horizonte	(cmol _c .dm ⁻³)		C.O. (%)	CTC	V (%)	m (%)	P (mg.dm ⁻³)
	H ⁺	Mn ⁺					
A	3,97	19,07	1,21	8,67	54,2	0,54	15,0
AE	3,39	4,84	0,35	5,75	41,1	0,41	2,4
E	2,96	1,21	0,17	6,18	52,2	0,52	0,9
BE/E	4,33	1,82	0,29	12,05	64,1	0,64	1,4
B1	3,97	1,21	0,22	14,23	72,1	0,72	1,4
B2	3,10	3,33	0,12	13,45	77,0	0,77	1,2
BC	2,67	3,63	0,09	13,05	79,6	0,80	1,5
C	2,09	7,27	0,03	12,99	83,9	0,84	1,9

Descrição morfológica do perfil da área relativamente baixa

Perfil: Planossolo descrito no município de Capão do Leão – RS

Data: 28/3/2007

Classificação: GLEISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico solódico

Localização:

Altitude: 13 m.

Situação, declividade e cobertura vegetal: trincheira em área plana com solo descoberto.

Formação geológica e litologia:

Material originário: sedimentos originados de rochas graníticas

Rochosidade: não rochoso

Pedregosidade: não pedregoso

Relevo local: plano

Relevo regional: plano, suave ondulado a ondulado

Drenagem: imperfeitamente drenado

Erosão:

Vegetação primária: gramíneas

Uso atual: talhões em culturas anuais

Descrito por: Luis Fernando Spinelli Pinto, José Maria Barbat Parfitt, Conceição Lagos de Ávila, Samira Jaber Suliman Audeh,.

Características morfológicas

A	0 – 20/28 cm; bruno-acinzentado muito escuro (10YR 3/2, úmido), bruno-acinzentado (10YR 5/2, seco); franco; fraca pequenos e médios blocos subangulares; friável, ligeiramente plástica a plástica e ligeiramente pegajosa; transição ondulada e clara.
E	20/28 – 30/38 cm; Cinzento-escuro a bruno-acinzentado-escuro (10YR 4/1,5 úmido), cinzento a bruno-acinzentado e cinzento-brunado-claro (10YR 5,5/1,5 seco); franco argiloso arenoso; maciço médios blocos angulares; friável, ligeiramente plástica a plástica e ligeiramente pegajosa a pegajosa; transição irregular e plana.
BE/E	30/38 – 38/48 cm; coloração variegada composta por acinzentado-escuro a bruno-acinzentado-escuro (10YR 4/1,5, úmido) e bruno-acinzentado (10YR 5/2, úmido), bruno-acinzentado a cinzento-brunado-claro (10YR 5,5/2, seco) e cinzentado-claro (10YR 7/2, seco); mosqueado pequeno comum distinta amarelo-brunado (10YR 6/8, úmido e seco); argiloso; moderada pequenos blocos angulares; firme, plástica e pegajosa; fraca e comum; transição irregular clara.
B	38/48 – 60/72 cm; coloração variegada composta por cinzento a bruno-acinzentado (10YR 5/1,5, úmido) e cinzento-escuro (10YR 4/1, úmido), cinzento-brunado-claro (10YR 6/2, seco) e bruno-acinzentado (10YR 5/2, seco); mosqueados abundantes médios e grandes bruno-amarelo (10YR 5/6, úmido), amarelo (10YR 7/6, seco); argiloso; moderada médios blocos angulares; firme, plástica e pegajosa; moderada e comum; transição irregular clara.
BC	60/70 – 77/95 cm; coloração variegada composta por bruno-acinzentado (10YR 5/2, úmido) e cinzento-brunado-claro a cinzento-claro (10YR 6,5/2, úmido), Variegado bruno muito claro-acinzentado (10YR 8/2, seco) e cinzento-claro (10YR 7/2, seco); mosqueados comuns grandes médios branco (10YR 8/1, umido), bruno-amarelo (10YR 5/8, úmido) pouco pequeno N2/ pequeno (óxido de Mn); mosqueado branco (10YR 8/1, seco); argiloso; moderado pequenos e médios blocos angulares; firme a friável, plástica e pegajosa; transição clara e irregular.
C	77/95 – 1,10 cm ⁺ ; coloração variegada composta por branco (10YR 8/1, umido) e bruno-acinzentado a cinzento-brunado-claro (10YR 5,5/2, úmido), branco (10YR 8/1, seco) e cinzento-brunado-claro (10YR 6/2, seco); mosqueados poucos e grandes N2/ pequenos (óxido de Mn) bruno amarelado (10YR 5/8, umido); amarelo (10YR 7/8, seco) argilo arenoso a franco argilo arenoso; maciça; friável a firme, plástica ligeiramente pegajosa a pegajosa.

OBS:

Análises Físicas e químicas

Horizonte		Granulometria (%)					Arg.	Textura	Silte/
Símbolo	Profundidade (cm)	Areia grossa	Areia fina	A. M. fina	Silte	Argila	disp. (%)		Argila
A	0 - 20/28	26,20	11,30	6,20	36,01	20,29	7,68	franca	1,78
E	20/28 - 30/38	25,10	10,90	6,90	39,10	18,00	7,7	franca	2,18
BE/E	30/38 - 38/48	25,00	8,80	4,10	36,73	25,37	14,76	franca	1,43
							-	Franco	
B	38/48 - 60/72	18,80	8,40	4,30	38,36	30,14		argilosa	1,25
BC	60/72 - 77/95	15,60	7,50	4,50	49,56	22,84	-	franca	2,18
							-	Franco	
C	110 +	18,30	7,60	4,40	61,52	8,18		siltosa	7,54

A.M. Fina = areia muito fina; Arg. disp. = argila dispersa em água

Complexo sortivo

Horizonte	pH		Complexo Sortivo (cmolc.dm ⁻³)					
	Água	KCl	Ca ⁺⁺	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	Mn	Al ⁺⁺⁺
A	5,07	4,15	3,12	1,64	25,8	38,5	13,93	0,46
E	4,8	3,78	1,54	1,08	10,3	59,3	5,15	1,32
BE/E	4,81	3,62	3,10	2,33	21,7	116,5	7,27	1,78
B	5,21	3,76	4,84	3,98	36,2	292,8	2,42	1,19
BC	5,95	4,31	5,07	4,36	39,3	378,4	2,12	0,27
C	6,44	4,6	3,76	3,46	35,1	355,9	2,72	0,14

Horizonte	(cmolc.dm ⁻³)		C.O. (%)	CTC	V (%)	m (%)	P (mg.dm ⁻³)
	H ⁺	S ⁺					
A	4,25	5,05	1,34	9,30	54,3	0,54	9,5
E	4,25	2,92	0,55	7,17	40,7	0,41	1,5
BE/E	4,69	6,02	0,62	10,71	56,2	0,56	2,4
B	3,75	10,20	0,35	13,95	73,1	0,73	1,0
BC	2,09	11,19	0,12	13,28	84,3	0,84	1,2
C	1,51	8,87	0,09	10,38	85,4	0,85	1,9

APÊNDICE B

Tabela B – Estatística descritiva dos conteúdos de água voluméricos(θ) e gravimétricos (Ug) retidos no solo, nas tensões de 1, 6, 10, 33, 100 e 1500kPa.

Variável	Media	Mdna.	DP	CV	Mín.	Max.	Assim.	Curtose	K-S
θ 1kPa	0,384	0,384	0,021	5,41	0,339	0,436	0,08	-0,12	0,04
θ 6kPa	0,326	0,325	0,019	5,87	0,285	0,396	0,55	0,81	0,07
θ 10kPa	0,312	0,313	0,024	7,59	0,248	0,394	-0,22	0,82	0,09
θ 33kPa	0,279	0,277	0,024	8,60	0,230	0,353	0,46	0,03	0,07
θ 100kPa	0,243	0,241	0,023	9,48	0,193	0,338	0,69	2,38	0,07
θ 1500kPa	0,187	0,184	0,038	20,58	0,115	0,292	0,38	-0,39	0,06
Ug1kPa	0,241	0,241	0,023	9,5	0,19	0,32	0,36	0,39	0,06
Ug6kPa	0,204	0,201	0,018	8,9	0,167	0,247	0,27	-0,32	0,10
Ug10kPa	0,196	0,196	0,020	10,3	0,144	0,243	-0,23	-0,02	0,06
Ug33kPa	0,175	0,174	0,018	10,3	0,134	0,216	0,09	-0,32	0,05
Ug100kPa	0,152	0,153	0,016	10,7	0,117	0,207	0,33	0,80	0,06
Ug1500kPa	0,117	0,116	0,024	20,7	0,071	0,178	0,30	-0,29	0,05

θ 1kPa = conteúdo de água volumétrico no solo na tensão de 1kPa ($\text{cm}^3.\text{cm}^{-3}$), e assim por diante; Ug1kPa= conteúdo de água gravimétrico no solo na tensão de 1kPa (g.g^{-1}), e assim por diante; Mdna.= mediana; DP = Desvio Padrão; CV= coeficiente de variação (%); Mín.= valor mínimo; Max.=valor maximo; Assim. = coeficiente de assimetria; K-S= valor do teste de Kolmogorov-Smirnov (Valor crítico = 0.121 para alfa = 10%).

APÊNDICE C

Tabela C – Estatística descritiva dos atributos físicos e químicos avaliados.

Variável	Média	Mediana	DP	CV	Mín.	Max.	Assim.	Curtose	K-S
Argila	143,4	144,3	1,32	9,19	116,6	181,3	0,08	-0,21	0,05
Silte	398,9	396,9	3,28	8,23	332,9	483,4	0,17	-0,54	0,04
Areia	458,3	457,2	3,72	8,13	384,7	540,7	0,19	-0,69	0,06
MO	2,09	2,09	0,17	8,48	1,69	2,59	0,28	0,21	0,07
Ds	1,60	1,60	0,07	4,55	1,36	1,75	-0,52	0,52	0,06
Dp	2,52	2,52	0,07	3,02	2,39	2,68	0,08	-0,22	0,08
DMP	1,71	1,83	0,46	24,7	0,79	2,95	0,53	-0,15	0,08
Pt	40,57	40,57	2,75	6,77	33,49	47,65	-0,01	0,00	0,06
MacroP	8,01	8,13	2,06	25,75	3,19	13,21	0,01	-0,19	0,06
MicroP	32,56	32,46	1,91	5,88	28,59	39,69	0,55	0,81	0,07
CO	12,13	12,13	1,028	8,5	9,85	15,07	0,29	0,22	0,07
pH H ₂ O	4,9	4,9	0,174	3,6	4,5	5,4	0,41	0,21	0,06
CTC	9,68	9,84	1,00	10,3	7,24	11,69	-0,42	-0,64	0,08

Argila, silte e areia em g.kg⁻¹; MO = matéria orgânica no solo (%); Ds = densidade do solo (Mg.m⁻³); Dp = densidade de partículas (g.cm⁻³); DMP = diâmetro médio ponderado (mm); Pt = porosidade total (%); MacroP = macroporosidade(%); MicroP = microporosidade (%); CO = Carbono orgânico (g.kg⁻¹); CTC= Capacidade de Troca de Cátions (cmol.dm⁻³); DP = Desvio Padrão; CV= coeficiente de variação (%); Mín.= valor mínimo; Max.= valor máximo; Assim. = coeficiente de assimetria; Curtose = coeficiente de curtose; K-S= valor da estatística referente ao teste de Kolmogorov-Smirnov (valor crítico = 0,121 para alfa = 10%).

APÊNDICE D

Tabela D1 – Coeficientes de correlação entre as variáveis físicas e químicas avaliadas e o conteúdo volumétrico (θ) de água nas tensões analisadas.

Variáveis	θ 1 kPa	θ 6 kPa	θ 10 kPa	θ 33 kPa	θ 100 kPa	θ 1500 kPa
argila	0,18 ^{NS}	0,18 ^{NS}	0,31**	0,17 ^{NS}	0,22*	0,24*
silte	0,33**	0,53**	0,52**	0,41**	0,31**	0,30**
areia	-0,36**	-0,53**	-0,63**	-0,51**	-0,34**	-0,41**
Ds	-0,75**	-0,41**	-0,43**	-0,17 ^{NS}	-0,09 ^{NS}	-0,04 ^{NS}
Dp	-0,20**	-0,19 ^{NS}	-0,28**	-0,21*	-0,27**	-0,13 ^{NS}
Pt	0,85**	0,62**	0,64**	0,37**	0,36**	0,18 ^{NS}
MacroP	0,54**	-0,07 ^{NS}	0,03 ^{NS}	-0,23*	-0,07 ^{NS}	-0,18 ^{NS}
MicroP	0,63**	0,98**	0,89**	0,79**	0,59**	0,46**
DMP	0,16 ^{NS}	0,25*	0,24*	0,23*	0,16 ^{NS}	0,09 ^{NS}
CO	0,30**	0,41**	0,46**	0,32**	0,32**	0,28**
MO	0,30*	0,37*	0,42**	0,29**	0,32**	0,26**
pH H ₂ O	-0,11 ^{NS}	-0,05 ^{NS}	-0,13 ^{NS}	-0,15 ^{NS}	0,08 ^{NS}	-0,01 ^{NS}
CTC	0,27**	0,25*	0,44**	0,19 ^{NS}	0,27**	0,22*

** significativo a 1% (p-valor < 0,01); * significativo a 5% (0,01 < p-valor < 0,05); ^{NS} não significativo (p-valor > 0,05); Ds = densidade do solo (Mg.m⁻³); Pt = porosidade total (%); MacroP = macroporosidade (%); MicroP = microporosidade (%); DMP = diâmetro médio ponderado (mm); CO = teor de carbono orgânico (g.kg⁻¹); CTC = capacidade de troca de cátions (cmol_c.dm⁻³).

Tabela D2 – Coeficientes de correlação entre as variáveis físicas e químicas avaliadas e o conteúdo de água gravimétrico (Ug) de água nas tensões analisadas.

Variáveis	Ug 1 kPa	Ug 6 kPa	Ug 10 kPa	Ug 33 kPa	Ug 100 kPa	Ug 1500 kPa
argila	0,24*	0,26**	0,35**	0,27**	0,31**	0,30**
silte	0,39**	0,56**	0,61**	0,60**	0,44**	0,45**
areia	-0,43**	-0,58**	-0,66**	-0,62**	-0,50**	-0,50**
Ds	-0,93**	-0,81**	-0,77**	-0,59**	-0,51**	-0,18 ^{NS}
Dp	-0,24*	-0,26**	-0,31**	-0,28**	-0,34**	-0,18 ^{NS}
Pt	0,88**	0,85**	0,81**	0,69**	0,65**	0,35**
MacroP	0,64**	0,30**	0,32**	0,10 ^{NS}	0,22*	-0,04 ^{NS}
MicroP	0,57**	0,87**	0,83**	0,84**	0,70**	0,55**
DMP	0,14 ^{NS}	0,22*	0,22*	0,24*	0,19 ^{NS}	0,12 ^{NS}
Co	0,36**	0,46**	0,50**	0,43**	0,45**	0,37**
Mo	0,35**	0,43**	0,46**	0,40**	0,43**	0,34**
pH H ₂ O	-0,11 ^{NS}	-0,08 ^{NS}	-0,14 ^{NS}	-0,16 ^{NS}	0,04 ^{NS}	-0,03 ^{NS}
CTC	0,32**	0,34**	0,47**	0,31**	0,38**	0,29**

APÊNDICE E

Tabela E – Coeficientes de correlação de Pearson entre as variáveis físicas e químicas analisadas.

Variáveis	Ds	Pt	MacroP	MicroP	CO	CTC	argila	silte	areia
Ds	1,00	-0,80**	-0,67**	-0,44**	-0,38**	-0,35**	-0,28**	-0,41**	0,46**
Pt	-0,80	1,00	0,68**	0,66**	0,40**	0,44**	0,29**	0,45**	-0,50**
MacroP	-0,67	0,68	1,00	-0,07 ^{NS}	0,15 ^{NS}	0,36**	0,22*	0,09 ^{NS}	-0,16 ^{NS}
MicroP	-0,44	0,66	-0,07	1,00	0,43**	0,31**	0,23*	0,57**	-0,59**
CO	-0,38	0,40	0,15	0,43	1,00	0,47**	0,23*	0,58**	-0,60**
CTC	-0,35	0,44	0,36	0,31	0,47	1,00	0,57**	0,41**	-0,56**
argila	-0,28	0,29	0,22	0,23	0,23	0,57	1,00	0,16 ^{NS}	-0,49**
silte	-0,41	0,45	0,09	0,57	0,58	0,41	0,16	1,00	-0,94**
areia	0,46	-0,50	-0,16	-0,59	-0,60	-0,56	-0,49	-0,94	1,00

** significativo a 1% (p-valor < 0,01); * significativo a 5% (0,01 < p-valor < 0,05); ^{NS} não significativo (p-valor > 0,05); Ds = densidade do solo (Mg.m⁻³); Pt = porosidade total (%); MacroP = macroporosidade (%); MicroP = microporosidade (%); DMP = diâmetro médio ponderado (mm); CO = teor de carbono orgânico (g.kg⁻¹); CTC = capacidade de troca de cátions (cmol_c.dm⁻³).

APÊNDICE F

Tabela F1 - Teste de ajuste dos semivariogramas para diferentes lags

Lag (m)	r^2	C0	C0+C	A	SQR
2,0	0,780	$7,0 \times 10^{-5}$	$2,7 \times 10^{-4}$	45,00	$73,7 \times 10^{-10}$
5,0	0,953	$7,0 \times 10^{-5}$	$2,6 \times 10^{-4}$	44,60	$6,18 \times 10^{-10}$
7,0	0,886	$8,0 \times 10^{-5}$	$2,7 \times 10^{-4}$	47,90	$21,2 \times 10^{-10}$
10,0	0,996	$7,0 \times 10^{-5}$	$2,6 \times 10^{-4}$	45,90	$0,38 \times 10^{-10}$
12,0	0,990	$8,0 \times 10^{-5}$	$2,7 \times 10^{-4}$	48,40	$1,16 \times 10^{-10}$
15,0	0,999	$7,0 \times 10^{-5}$	$2,6 \times 10^{-4}$	44,80	$0,07 \times 10^{-10}$
médias	0,934	7,3	2,65	46,1	$17,11 \times 10^{-10}$

Tabela F2 – Parâmetros dos semivariogramas teóricos calculados para $\theta 10\text{kPa}$, $\theta 33\text{kPa}$ e $\theta 1500\text{kPa}$ para duas distâncias máximas de cálculo (1/2d e 1 d) e dois intervalos (lags) (5,0m e 10,0m).

Intervalo	Modelo	C0	C+C0	A	r^2	GDE	SQR	r^{2*}	CR*
$\theta 10\text{kPa}$									
1/2d - 5m ^{*1}	Esf	$2,3 \times 10^{-4}$	$4,9 \times 10^{-4}$	53,9	0,84	46,9	$5,1 \times 10^{-9}$	0,23	0,98
1/2d - 10m ^{*2}	Exp	$1,9 \times 10^{-4}$	$5,3 \times 10^{-4}$	77,1	0,98	35,8	$3,8 \times 10^{-10}$	0,23	0,94
1d - 5m	Esf	$2,1 \times 10^{-4}$	$4,7 \times 10^{-4}$	46,1	0,39	44,7	$4,6 \times 10^{-8}$	0,23	0,94
1d - 10m	Esf	$2,2 \times 10^{-4}$	$4,7 \times 10^{-4}$	49,4	0,47	46,8	$2,9 \times 10^{-8}$	0,23	0,96
$\theta 33\text{kPa}$									
1/2d - 5m	Esf	$2,2 \times 10^{-4}$	$5,3 \times 10^{-4}$	50,1	0,81	41,5	$8,4 \times 10^{-9}$	0,28	0,98
1/2d - 10m	Esf	$2,4 \times 10^{-4}$	$5,3 \times 10^{-4}$	51,6	0,98	45,3	$4,6 \times 10^{-10}$	0,28	1,01
1d - 5m	Esf	$2,1 \times 10^{-4}$	$5,2 \times 10^{-4}$	48,4	0,29	40,4	$1,2 \times 10^{-7}$	0,28	0,96
1d - 10m	Esf	$2,3 \times 10^{-4}$	$5,5 \times 10^{-4}$	57,5	0,30	41,8	$1,2 \times 10^{-7}$	0,28	1,01
$\theta 1500\text{kPa}$									
1/2d - 5m	Esf	$1,5 \times 10^{-4}$	$1,4 \times 10^{-3}$	28,5	0,64	11,0	$1,1 \times 10^{-7}$	0,25	0,74
1/2d - 10m	Esf	$7,9 \times 10^{-5}$	$1,4 \times 10^{-3}$	23,6	0,97	5,8	$4,0 \times 10^{-9}$	0,23	0,70
1d - 5m	Esf	$1,5 \times 10^{-5}$	$1,3 \times 10^{-3}$	21,1	0,15	1,2	$4,7 \times 10^{-7}$	0,21	0,67
1d - 10m	Esf	$1,7 \times 10^{-5}$	$1,3 \times 10^{-3}$	20,8	0,37	1,3	$1,3 \times 10^{-7}$	0,21	0,68

1/2d = distância máxima igual a metade da maior diagonal da malha; 1d = distância máxima igual a maior diagonal da malha; ^{*1} = intervalo de classe de lag (5,0m); ^{*2} = intervalo de classe de lag (10,0m); Esf = modelo esférico; Exp = modelo exponencial; C0 = efeito pepita; C+C0 = patamar; A = alcance (m); r^2 = coeficiente de ajuste do modelo esférico; GDE = grau de dependência espacial; r^{2*} = coeficiente de determinação da validação cruzada; CR* = coeficiente de regressão da validação cruzada.

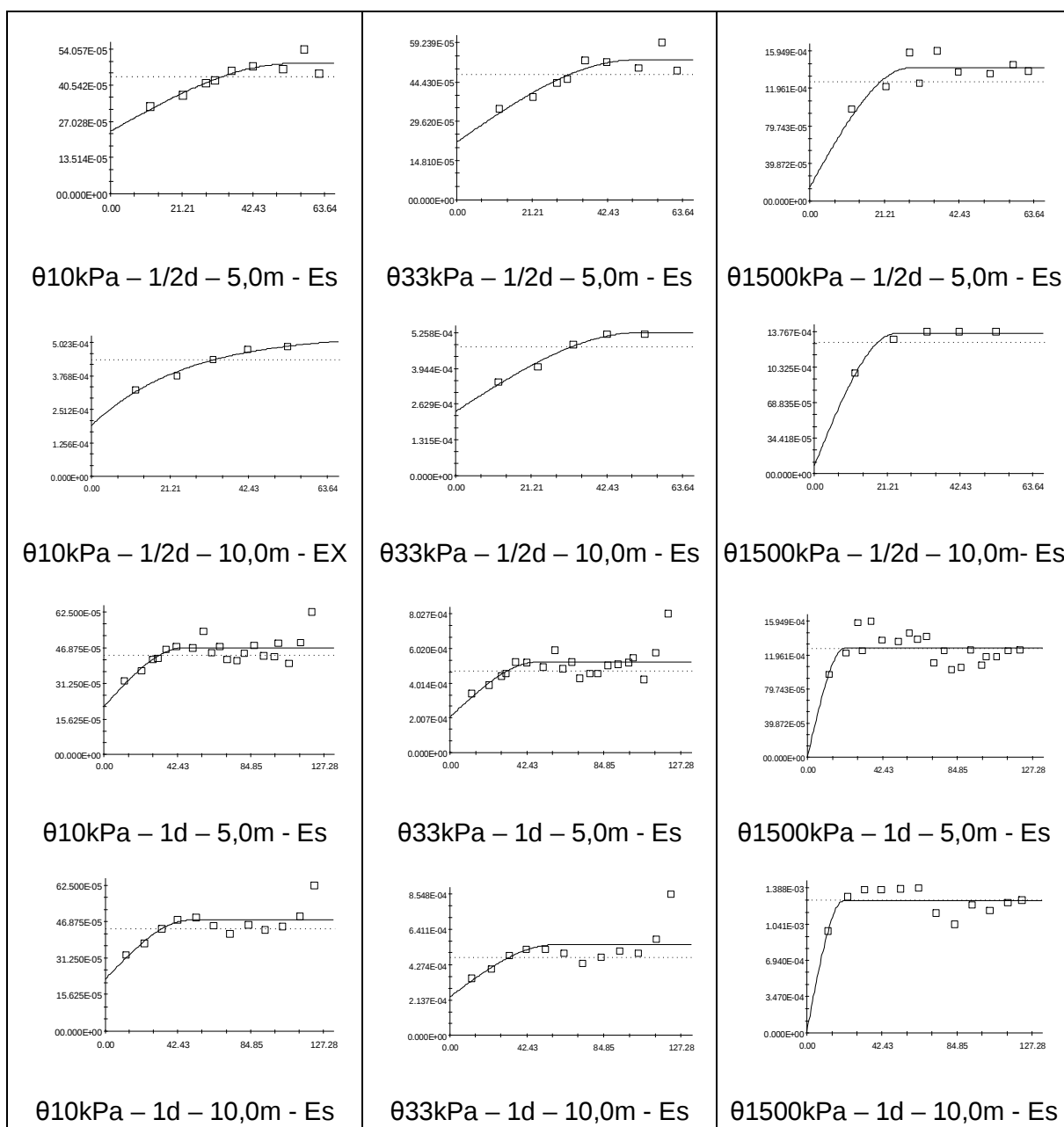


Figura F1 – Semivariogramas ajustados aos modelos esférico (Es) ou exponencial (EX), construídos para distância de cálculo igual a metade da maior diagonal da malha (1/2d) e para toda a maior diagonal (1d), com os intervalos de classe de lags de 5,0m e 10,0m para os valores ajustados de 010kPa, 033kPa e 01500kPa.

APÊNDICE G

Tabela G1 – Funções de Pedotransferência paramétricas avaliadas no estudo.

Autor	Função de Pedotransferência
Vereecken et al. (1989)	$\theta_s = 0,81 - 0,283 Ds + 0,001 \text{ argila}$ $\theta_r = 0,015 + 0,005 \text{ argila} + 0,014 Co$ $\ln \alpha = -2,486 + 0,025 \text{ areia} - 0,351 Co - 2,617 Ds - 0,023 \text{ argila}$ $\ln n = 0,053 - 0,009 \text{ areia} - 0,013 \text{ argila} + 0,00015 \text{ areia}^2$
Van den Berg et al. (1997)	$\theta_s = 84,1 - 0,206 \text{ argila.Ds} - 0,322 (\text{areia.Ds} + \text{silte.Ds})$ $\theta_r = 0,308 \text{ argila.Ds}$ $\ln \alpha = -0,627$ $m = 0,503 - 0,0027 (\text{silte.Ds} + \text{argila.Ds}) - 0,066 Co.Ds + 0,0094 CTC^{*1}$
Tomasella et al. (2000)	$\theta_s = [91,6203 - 30,0046 Ds + 1,5925 Co + 0,0022 (\text{ar gr} \cdot \text{areia}) + 0,0036 (\text{ar gr} \cdot \text{argila}) - 0,0018 (\text{ar gr}^2) - 0,001 (\text{ar fin}^2)] / 100$ $\theta_r = [23,3867 + 0,1103 \text{ argila} - 4,7949 Ds + 0,0047(\text{argila} \cdot \text{areia}) - 0,0027(\text{ar gr})^2 - 0,0022 (\text{ar fin})^2 - 0,0048 (\text{areia})^2] / 100$ $\ln \alpha = [205,6546 - 2,556 \text{ areia} - 0,1329 \text{ argila} - 247,4904 Ds - 0,0189 (\text{ar gr} \cdot \text{ar fin}) + 0,1177 (\text{ar gr} \cdot \text{areia}) + 0,0517 (\text{ar fin} \cdot \text{argila}) + 0,0617 (\text{ar gr})^2] / 100$ $n = [168,8617 - 0,0258 (\text{ar gr} \cdot \text{areia}) - 0,0261 (\text{ar fin} \cdot \text{argila}) + 0,0093 (\text{ar fin})^2 - 0,0077 (\text{areia})^2] / 100$
Hodnett e Tomasella (2002)	$\theta_s = [81,799 + 0,099 \text{ argila} - 32,42 Ds + 0,018 CTC + 0,451 pH - 0,0005 (\text{areia} \cdot \text{argila})] / 100$ $\theta_r = [22,733 - 0,164 \text{ areia} + 0,235 CTC^{*2} - 0,831 pH + 0,0018 (\text{argila})^2 + 0,0026 (\text{areia} \cdot \text{argila})] / 100$ $\ln \alpha = [-2,294 - 3,256 \text{ silte} + 2,44 Co - 0,076 CTC - 11,331 pH + 0,019 (\text{silte})^2] / 100$ $\ln n = [62,986 - 0,833 \text{ argila} - 0,529 Co + 0,593 pH + 0,0070 (\text{argila})^2 - 0,014 (\text{areia} \cdot \text{silte})] / 100$
Tomasella et al. (2003)	$\theta_s = 0,515224 + 0,100899Z5$ $\theta_r = 0,161487 + 0,101111Z6$ $\alpha = 10^{0,0736768 + 0,789068 Z2}$ $n = 10^{0,140543 + 0,0797516 Z4}$

^{*1}CTC = capacidade de troca de cátions (cmol_cdm⁻³); ^{*2} em cmol.kg⁻¹; areia, silte e argila (%); Co = conteúdo de carbono orgânico no solo (%); ar gr = areia grossa (>0,215mm, em %); ar fin = areia fina (<0,215mm, em %); Ds = densidade do solo (Mg.m⁻³).

Tabela G2 – Equações dos algoritmos da FPT de Tomasella et al. (2003)

Equações
$X1 = -1,0679 + 0,0536107 \text{ (areia grossa)}$
$X2 = -1,17468 + 0,0808098 \text{ (areia fina)}$
$X3 = -1,05976 + 0,0650437 \text{ (areia)}$
$X4 = -2,10641 + 0,0427715 \text{ (argila)}$
$X5 = -2,21391 + 8,92268 \text{ (umidade equivalente)}$
$X6 = -6,03516 + 4,81197 \text{ (Ds)}$
$Z1 = 4,25417X1 + 2,72322X2 + 3,07242X3 + 5,00093X4 - 0,195062X5 - 0,377081X6$
$Z2 = 0,110144 + 0,640373Z1 - 1,16884(Z1)^2 - 0,155394X4 - 0,358591Z1X4$ $- 1,00996 (Z1)^2X4 + 0,126617(X4)^3$
$Z3 = 0,37398X1 - 0,0940338(X1)^3 + 0,838535X1X5 - 0,590525(X1)^2X5 + 0,76113(X5)^2$ $- 0,789465X1(X5)^2 - 0,273647(X5)^3 - 0,512764X6 + 0,455363X1X6 - 0,38428(X1)^2X6$ $+ 0,731809X5X6 - 1,00484X1X5X6 - 0,172341(X5)^2X6 + 0,219746(X6)^2$ $+ 0,131251(X6)^3$
$Z4 = -0,360294 + 0,76878Z3 + 0,0770122(Z3)^3 - 0,193142X2 - 0,121583Z3X2$ $+ 0,0889415(Z3)^2X2 + 0,284168(X2)^2 - 0,0674767(X2)^3 - 0,202897X3 - 0,341951Z3X3$ $- 0,270616X2X3 + 0,0880845(X2)^2X3 + 0,24982(X3)^2 + 0,102658X2(X3)^2$ $- 0,0801841(X3)^3$
$Z5 = 0,164417 + 0,126139(X1)^2 + 0,281797X3 + 0,484823X1X3 - 0,293866(X3)^2$ $- 0,354924X1(X3)^2 - 0,705803X6 - 0,189153X3X6 - 0,267997X1X3X6$ $- 0,023954(X3)^2X6 - 0,0918816X1(X6)^2 + 0,0323997(X6)^3$
$Z6 = 0,12867 - 0,492412X3 + 0,787425X5 - 0,235254X3X5$

Areia, areia grossa (>0,215mm), areia fina (<0,215mm) e argila em %; Ds= densidade do solo (Mg.m^{-3}); umidade equivalente = conteúdo de água gravimétrico retido no solo sob a tensão de 33kPa (%).

This document was created with Win2PDF available at <http://www.win2pdf.com>.
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.
This page will not be added after purchasing Win2PDF.