

Funções de Pedotransferência para estimativa da condutividade hidráulica do solo saturado, em solos da Depressão Central do RS⁽¹⁾.

Miriam Fernanda Rodrigues⁽²⁾; André da Costa⁽³⁾; Lilian Alessandra Rodrigues⁽⁴⁾; Greissi Tente Giraldi⁽⁵⁾; Jose Miguel Reichert⁽⁶⁾; Norton Borges Júnior⁽⁷⁾.

⁽¹⁾ Trabalho executado com recursos da CAPES, do CNPq, FAPERGS e da empresa Celulose Riograndense (CMPC).

⁽²⁾ Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal (PPGEF); Universidade Federal de Santa Maria (UFSM); Santa Maria-RS, miriamf_rodrigues@yahoo.com.br; ⁽³⁾ Pós-doutorando do PPGEF; Universidade Federal de Santa Maria; ⁽⁴⁾ Estudante de Engenharia Florestal; Universidade Federal de Santa Maria; ⁽⁵⁾ Estudante de Agronomia; Universidade Federal de Santa Maria; ⁽⁶⁾ Professor titular do Departamento de Solos; Universidade Federal de Santa Maria; ⁽⁷⁾ Pesquisador da Empresa Celulose Riograndense (CMPC).

RESUMO: Um dos parâmetros mais sensíveis dos modelos de base física de predição dos processos erosivos é a condutividade hidráulica do solo saturado (Ksat). Objetivou-se gerar e validar Funções de Pedotransferência (FPTs) para a estimar a Ksat, para solos sob cobertura florestal derivados de rochas ígneas intrusivas e metamórficas no RS. O estudo foi realizado na Bacia hidrográfica do horto florestal Terra Dura, Eldorado do Sul/RS. Foram amostrados horizontes de 30 perfis de solo; determinou-se: Ksat, granulometria, densidade do solo, porosidade total e umidade do solo. A análise estatística foi realizada por meio da correlação de postos de Spearman, de análise regressão múltipla e robusta, para geração e validação de FPTs pontuais para estimativa da Ksat, com quatro conjuntos de variáveis predictoras. A Ksat é dependente principalmente da fração cascalho + calhaus e pode ser estimada por meio de FPT, usando as frações > 4mm, silte e argila do solo.

Termos de indexação: FPTs, análise de correlação, análise de regressão.

INTRODUÇÃO

Modelos de base física para a predição da erosão e da produção de sedimentos, como o Limburg Soil Erosion Model (LISEM), utilizam algumas propriedades físicas do solo como dados de entrada (Jetten, 2002). A condutividade hidráulica do solo saturado (Ksat) é um dos dados de entrada que, juntamente com o n de Manning e a umidade antecedente do solo, possui maior sensibilidade para o LISEM (De Roo et al., 1996).

Contudo, a Ksat possui elevada variabilidade espacial e a sua determinação, geralmente, é demorada e trabalhosa quando realizada em campo e pouco representativa quando realizada em laboratório (Dalbianco, 2009). Assim, a

estimativa da Ksat por meio de Funções de Pedotransferência (FPTs) é uma alternativa para descrever, de forma rápida e econômica, a dependência da Ksat em relação às propriedades disponíveis nos estudos de solos.

Diante do exposto, objetivou-se gerar e validar Funções de Pedotransferência (FPTs) para a estimativa da condutividade hidráulica do solo saturado, para solos sob cobertura florestal derivados de rochas ígneas intrusivas e metamórficas no Rio Grande do Sul.

MATERIAL E MÉTODOS

Área em estudo

A área em estudo, denominada como Bacia hidrográfica do horto florestal Terra Dura (Bacia), possui área de drenagem de 94,46 ha e está inserida na Bacia Hidrográfica do Rio Jacuí, em Eldorado do Sul, na região fisiográfica Depressão Central do Estado do Rio Grande do Sul, Sul do Brasil.

O clima da região, pela classificação climática de Köppen, é do tipo Cfa - subtropical úmido com verão quente (Moreno, 1961).

O uso do solo consiste no sistema de produção florestal, com povoamentos de eucalipto implantados em 1989, 1990, 2001, 2004, 2005, 2007 e 2010, além de áreas de preservação permanente (APP) e estradas.

A geologia da área é composta de rochas ígneas intrusivas, sienogranitos, correspondente à Suíte Intrusiva Dom Feliciano - Litofácies Serra do Herval, do Período Neoproterozóico (2500 Ma) (Ramgrab et al., 2004). As classes de solo que ocorrem no local são Argissolo Vermelho, Argissolo Vermelho-Amarelo, Argissolo Amarelo, Planossolo Háplico e Cambissolo Háplico.

Amostragem e análises de solo

Uma malha com 30 pontos de coleta foi estabelecida, na área da Bacia, para abranger distintas classes de solo e de uso e distintas

posições na paisagem de acordo com a variação do relevo. Em cada ponto foi aberta uma trincheira, exposto o perfil e separados os horizontes, nos quais foram coletadas amostras com estrutura alterada e 4 amostras com estrutura preservada, em cilindros metálicos de 0,057 m de diâmetro e 0,04 m de altura, para determinar a condutividade hidráulica do solo saturado (K_{sat}) e a umidade do solo nas tensões de 1, 6, 10, 33 e 100 kPa.

A granulometria da fração < 2 mm foi determinada pelo método da pipeta (Embrapa, 1997). A distribuição granulométrica das frações > 2 mm foi determinada por peneiramento.

As amostras com estrutura preservada foram preparadas em laboratório, saturadas por capilaridade e pesadas, para determinação da porosidade total (Pt), sendo em seguida, submetidas às tensões de 1, 6, 10 kPa em coluna de areia e 33 e 100 kPa em câmara de Richards (Klute, 1986). Ao final, as amostras foram mantidas em estufa a 105 °C até atingirem peso constante, para determinação da densidade do solo (Ds).

A umidade gravimétrica para as tensões de 500, 1000 e 1500 kPa foi analisada com psicrômetro (WP4 – Dewpoint Potential Meter), utilizando-se amostras com estrutura deformada (Klein et al., 2006). A umidade gravimétrica foi multiplicada pela Ds correspondente ao horizonte, para determinar a umidade volumétrica.

A K_{sat} foi determinada em laboratório, com saturação das amostras por 48 horas e posterior análise com permeâmetro de carga constante (Embrapa, 1997), com o método modificado. O volume de água percolado das amostras foi medido em três momentos com intervalos de cinco minutos após o início da percolação.

Análise estatística

Os dados foram submetidos ao teste de normalidade, onde se identificou que algumas variáveis não possuíam distribuição normal. Por isso, realizou-se a análise de correlação de postos de Spearman entre a K_{sat} e as demais propriedades físicas do solo, para identificação de variáveis preditoras com potencial de uso nas geração das FPTs, método este que não pressupõe a distribuição normal dos dados.

Os valores de K_{sat} foram submetidos à transformação Box-Cox, para obter a distribuição normal dos dados. A K_{sat} transformada ($T_{ksat} = K_{ksat}^{-0,06}$) foi utilizada como variável predita em todos os modelos avaliados.

Na geração das FPTs para a estimativa da T_{ksat} foram avaliados quatro conjuntos de variáveis preditoras, avaliando-se a melhoria na acurácia das FPTs com a inclusão do maior número possível de variáveis preditoras (**Tabela**

1). Os conjuntos de variáveis utilizados foram: **Mod. 1:** teor de areia fina, grossa e total, silte e argila ($g\ 100\ g^{-1}$); **Mod. 2:** mod. 1 + teor de cascalho + calhaus (5 classes de diâmetro); **Mod. 3:** mod. 2 + Ds e Pt e, **Mod. 4:** mod. 3 + retenção de água no solo (θ nas tensões de 1, 6, 10, 33, 100, 500 e 1000 e 1500 kPa).

Tabela 1 – Estatística descritiva de propriedades físicas de solos sob cobertura florestal derivados de rochas ígneas intrusivas e metamórficas no Rio Grande do Sul.

Propriedade	Unidade	Med*	Mín*	Máx*
K_{sat}	$mm\ h^{-1}$	86	2	4393
Argila ⁽¹⁾	$g\ 100\ g^{-1}$	25	8	72
Silte ⁽¹⁾	$g\ 100\ g^{-1}$	21	9	48
Areia fina ⁽¹⁾	$g\ 100\ g^{-1}$	32	4	64
Areia grossa ⁽¹⁾	$g\ 100\ g^{-1}$	16	4	30
Areia total	$g\ 100\ g^{-1}$	50	9	78
Fração < 2 mm ⁽²⁾	$g\ 100\ g^{-1}$	63	16	100
Fração 2,0-2,36 mm ⁽²⁾	$g\ 100\ g^{-1}$	5	0	13
Fração 2,36-2,8 mm ⁽²⁾	$g\ 100\ g^{-1}$	5	0	12
Fração 2,8-3,35 mm ⁽²⁾	$g\ 100\ g^{-1}$	5	0	19
Fração 4-3,35 mm ⁽²⁾	$g\ 100\ g^{-1}$	5	0	10
Fração > 4 mm ⁽²⁾	$g\ 100\ g^{-1}$	16	0	63
Ds	$g\ 100\ g^{-1}$	1,50	1,14	1,73
Pt	$g\ 100\ g^{-1}$	0,44	0,30	0,56
$\theta_{1\ kPa}$ ⁽³⁾	$cm^3\ cm^{-3}$	0,36	0,19	0,52
$\theta_{6\ kPa}$	$cm^3\ cm^{-3}$	0,30	0,13	0,49
$\theta_{10\ kPa}$	$cm^3\ cm^{-3}$	0,25	0,10	0,48
$\theta_{33\ kPa}$	$cm^3\ cm^{-3}$	0,23	0,08	0,45
$\theta_{100\ kPa}$	$cm^3\ cm^{-3}$	0,21	0,07	0,44
$\theta_{500\ kPa}$	$cm^3\ cm^{-3}$	0,20	0,07	0,42
$\theta_{1000\ kPa}$	$cm^3\ cm^{-3}$	0,17	0,05	0,35
$\theta_{1500\ kPa}$	$cm^3\ cm^{-3}$	0,15	0,04	0,33

⁽¹⁾Obtida em relação a fração de terra fina seca ao ar (fração < 2 mm); ⁽²⁾Obtida em relação a fração de terra fina seca ao ar + fração cascalho e calhaus (frações < 20000 mm); ⁽³⁾ θ = umidade volumétrica do solo.* Med: mediana; Mín: mínimo; Máx: máximo; K_{sat} : Condutividade hidráulica do solo saturado; Ds: Densidade do solo; Pt: porosidade total.

A geração e a validação de FPTs para estimativa da K_{sat} foram realizadas a partir da divisão do banco de dados, a geração foi realizada com 75% dos horizontes (n=50) e a validação com os 25% restantes (n=17). Para tanto, utilizou-se o pacote estatístico SAS (SAS, 1997).

As FPTs contínuas pontuais para estimativa da T_{ksat} foram obtidas por análise de regressão múltipla, usando a opção *stepwise* disponível no procedimento *Proc Reg*. Após a seleção das variáveis preditoras de cada FPT, utilizou-se a análise de regressão robusta, método LTS, por meio do procedimento *proc robustreg*, para eliminar os efeitos indesejados dos *outliers* e *leverages* no ajuste dos parâmetros de regressão múltipla de cada FPT.

Indicadores Estatísticos

Para cada uma das FPTs, após a transformação dos dados de Ksat medidos e estimados em sua escala original ($K_{sat} = T_{ksat}^{-16,67}$), foram determinados indicadores estatísticos (a, b, c e d) utilizados para compor banco de dados de geração e de validação das FPTs: a) Raiz do erro quadrático médio (REQM); b) Erro médio (EM); c) Índice de concordância (d) (Willmott, 1981) e d) Análise de regressão linear (Willmott, 1981).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A condutividade hidráulica do solo saturado (K_{sat}) se correlacionou com algumas propriedades físicas do solo (**Tabela 2**), para os solos sob cobertura florestal originados de rochas ígneas intrusivas e metamórficas presentes na área da Bacia, Depressão Central do Rio Grande do Sul. Em relação às frações granulométricas, observou-se maiores coeficientes de correlação com as frações > 4 mm e < 2 mm, o que indica o efeito positivo das frações cascalho e calhaus no aumento da K_{sat} para os solos derivados de rochas ígneas intrusivas e metamórficas do período Pré-Cambriano. Quanto à retenção de água, solos com menor retenção de água tiveram relação inversa à maior K_{sat} e este comportamento deve-se ao efeito direto da granulometria grossa do solo sobre a redução da retenção de água em baixas tensões, o que permite um maior fluxo vertical de água no solo, quando saturado.

A estimativa da k_{sat} teve uma baixa acurácia quando se utilizaram FPTs que compostas pelas frações granulométricas menores que 2 mm (**Tabelas 3 e 4**). Isto deve-se aos elevados teores de cascalho+calhaus nos solos avaliados, o que reduziu o efeito dos teores de areia, silte e argila sobre o movimento de água no solo saturado. A maior acurácia da FPT do Mod. 2, em comparação ao Mod. 1, comprovam a importância da fração cascalho+calhaus sobre a K_{sat} , o que evidencia a necessidade de avaliar esta fração para entender o comportamento físico da K_{sat} nos solos em estudo.

Ao considerar-se propriedades estruturais do solo, como a D_s e a P_t , observou-se que o coeficiente de determinação do Mod. 3, obtido no *proc transreg*, foi maior do que o observado no Mod. 2 (**Tabela 3**), entretanto, quando a K_{sat} foi avaliada em escala original, não se observou melhoria na acurácia dessa FPT pela inclusão da P_t (**Tabela 4**).

A umidade do solo em diferentes tensões (Mod. 4), quando adicionada às demais propriedades do solo presentes no Mod. 3, resultou em um aumento do coeficiente de determinação obtido

no *proc transreg* (Tabela 3). Todavia, quando a K_{sat} foi avaliada em escala original, não se observou aumento da acurácia desta FPT pela inclusão da umidade volumétrica na tensão de 10 kPa (**Tabela 4**), em comparação aos resultados observados para a FPT do Mod. 2.

Tabela 2 – Coeficiente de correlação de postos de Spearman (ρ) entre diferentes propriedades do solo com a condutividade hidráulica do solo saturado (K_{sat}) em solos sob cobertura florestal derivados de rochas ígneas intrusivas e metamórficas no Rio Grande do Sul.

Propriedade	P	Propriedade	P
Argila ⁽¹⁾	0,00	D_s	-0,18
Silte ⁽¹⁾	-0,21	P_t	0,26*
Areia fina ⁽¹⁾	0,32**	$\theta_{10\text{ kPa}}$ ⁽³⁾	-0,33**
Areia grossa ⁽¹⁾	-0,04	$\theta_{6\text{ kPa}}$	-0,43**
Areia total	0,19	$\theta_{10\text{ kPa}}$	-0,47**
Fração < 2mm ⁽²⁾	-0,45**	$\theta_{33\text{ kPa}}$	-0,43**
Fração 2,0-2,36 mm ⁽²⁾	0,16	$\theta_{100\text{ kPa}}$	-0,44**
Fração 2,36-2,8 mm ⁽²⁾	0,26*	$\theta_{500\text{ kPa}}$	-0,21
Fração 2,8-3,35 mm ⁽²⁾	0,32**	$\theta_{1000\text{ kPa}}$	-0,19
Fração 4-3,35 mm ⁽²⁾	0,34**	$\theta_{1500\text{ kPa}}$	-0,17
Fração > 4 mm ⁽²⁾	0,47**	-	-

⁽¹⁾ Expressa em $\text{g } 100\text{ g}^{-1}$, obtida em relação a fração de terra fina seca ao ar (fração < 2mm); ⁽²⁾ expressa em $\text{g } 100\text{ g}^{-1}$, obtida em relação a fração de terra fina seca ao ar + fração cascalho e calhaus (frações < 20000 mm); ⁽³⁾ θ = umidade volumétrica do solo, expressa em $\text{cm}^3\text{ cm}^{-3}$. * D_s : densidade do solo; P_t : porosidade total.

Tabela 3 – Funções de pedotransferência (FPTs) para estimativa da condutividade hidráulica saturada transformada ($TK_{sat} = K_{sat}^{0,06}$, mm h^{-1}) em solos sob cobertura florestal derivados de rochas ígneas intrusivas e metamórficas no Rio Grande do Sul.

Propriedade	Mod. 1	Mod. 2	Mod. 3	Mod. 4
Intercepto	0,8984	0,8461	1,0968	0,9699
Argila ⁽¹⁾	-	-	-0,0003	-
Silte ⁽¹⁾	-	-	0,0017	-
Areia Fina ⁽¹⁾	-0,0076	0,0001	-	-
Areia Grossa ⁽¹⁾	-	-	-	0,0034
Areia Total ⁽¹⁾	0,0035	-	-	-
Fração 2,36-2,8 mm ⁽²⁾	-	-	-	-
Fração 2,8-3,35 mm ⁽²⁾	-	-0,0031	-	-0,0048
Fração > 4 mm ⁽²⁾	-	-0,0033	-0,0024	-
Porosidade total ⁽³⁾	-	-	-0,6737	-0,9146
$\theta_{10\text{ kPa}}$ ⁽³⁾	-	-	-	0,7092
R^2 <i>proc robustreg</i>	0,30	0,60	0,66	0,78

⁽¹⁾ Expressa em $\text{g } 100\text{ g}^{-1}$, obtida em relação a fração de terra fina seca ao ar (fração < 2mm); ⁽²⁾ expressa em $\text{g } 100\text{ g}^{-1}$, obtida em relação a fração de terra fina seca ao ar + fração cascalho e calhaus (frações < 20000 mm); ⁽³⁾ θ = umidade volumétrica do solo, expressa em $\text{cm}^3\text{ cm}^{-3}$.

Observou-se que a dificuldade na estimativa da K_{sat} por meio de outros atributos físicos do solo é amplamente reportada na literatura

(Dalbianco, 2009), quando os resultados de avaliação da acurácia das FPTs para estimativa da Ksat (**Tabela 4**) foram comparados aos valores observados na literatura. Isto ocorre porque o movimento de água no solo é dependente de vários atributos físicos do solo, principalmente da distribuição e geometria dos poros no solo, os quais não são avaliados nas técnicas convencionais de avaliação da porosidade do solo, o que dificulta a modelagem.

CONCLUSÕES

A condutividade hidráulica do solo saturado é dependente das frações granulométricas do solo, principalmente da fração cascalho+calhaus, para os solos sob cobertura florestal derivados de rochas ígneas intrusivas e metamórficas no Rio Grande do Sul;

Funções de pedotransferência que considerem as frações granulométricas > 4 mm, silte e argila do solo podem ser utilizadas para a estimativa da condutividade hidráulica do solo saturado. Entretanto, a acurácia dessa FPT proporciona a superestimativa da Ksat para os horizontes com solos de baixa condutividade hidráulica.

REFERÊNCIAS

DALBIANCO, L. Variabilidade espacial e estimativa da condutividade hidráulica e caracterização físico-hídrica de uma microbacia hidrográfica rural. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.

DE ROO, A. P. J.; OFFERMANS, R. J. E.; CREMERS, N. H. D. T. LISEM: a single-event, physically based hydrological and soil erosion model for drainage basins.

II: sensibility analysis, validation and application. *Hydrological Processes*, 10:1119-1126, 1996.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro, EMBRAPA/CNPQ, 1997. 212p.

JETTEN, V. LISEM user manual, version 2.x. Utrecht Centre for Environment and Landscape Dynamics, Utrecht University, The Netherlands, 2002, 48p.

KLEIN, V. A.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J. Água disponível em um Latossolo Vermelho argiloso e murcha fisiológica de culturas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 10:646-650, 2006.

KLUTE, A. Methods of soil analysis. I. Physical and mineralogical methods. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America Journal, 1986.

MORENO, J. A. Clima do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, Secretaria da Agricultura do Rio Grande do Sul, 1961. 42p.

RAMGRAB, G. E.; WILDNER, W.; LOPES, R. C. et al. Ramdabrazil: folha SH. 22 - Porto Alegre. In: SCHOBENHAUS, C.; GONÇALVES, J. H.; SANTOS, J. O. S. et al. Eds. Carta geológica do Brasil ao milionésimo, sistema de informações geográficas: programa geologia do Brasil. Brasília, DF: CPRM, 2004. CD-ROM.

SAS INSTITUTE. Statistical Analysis System Institute – SAS/STAT Procedure guide for personal computers. Version 5, SAS Inst. Cary, NC. 1997..

WILLMOTT, C. J. On the validation of models. *Physical Geography*, 2:184-194, 1981.

Tabela 4 – Raiz do erro quadrático médio (REQM, mm h⁻¹), erro médio (EM, mm h⁻¹), índice de concordância (d), intercepto (a, mm h⁻¹), coeficiente angular (b) e coeficiente de determinação (R²) para as equações ajustadas entre a condutividade hidráulica do solo saturado medida e a estimada por diferentes FPTs para solos sob cobertura florestal derivados de rochas ígneas intrusivas e metamórficas no Rio Grande do Sul.

Indicador	----- Banco de Geração das FPTs (n=50 ⁽²⁾) -----				----- Banco de Validação das FPTs (n=17) -----			
	Mod. 1 ⁽¹⁾	Mod. 2	Mod. 3	Mod. 4	Mod. 1	Mod. 2	Mod. 3	Mod. 4
REQM	1136	1209	1256	1168	1076	358	593	722
Erro médio	-412	96	115	139	-274	-25	-42	87
d	0,35	0,79	0,77	0,77	0,28	0,94	0,83	0,83
a=0 ⁽³⁾	76 **	45	100	173	208	95	170	128
b=1 ⁽⁴⁾	0,05**	1,10	1,03	0,93	-0,06**	0,74**	0,53**	0,91
R ²	0,10*	0,50**	0,45**	0,44**	0,01	0,83**	0,50**	0,53**

⁽¹⁾ Mod. 1: Teores de areia fina, grossa e total, silte e argila, expressos em g 100 g⁻¹; Mod. 2: modelo 1 + teores cascalho+calhaus separados em 5 classes de diâmetro; Mod. 3: modelo 2 + densidade do solo e porosidade total; Mod. 4: modelo 3 + retenção de água no solo (θ nas tensões de 1, 6, 10, 33, 100, 500 e 1000 e 1500 kPa). ⁽²⁾n= número de horizontes em cada banco. ⁽³⁾Nível de significância do teste F na ANOVA (* e ** significativo a 5% e 1%, respectivamente) para o intercepto, um nível > 0,05 indica que o parâmetro "a" da equação da reta não difere de zero. ⁽⁴⁾Nível de significância do teste F na ANOVA (* e ** significativo a 5% e 1%, respectivamente) para a inclinação, um nível de significância > 0,05 indica que o parâmetro "b" da equação da reta não difere de 1.