



Limites de água disponível para a modelagem hidrológica com o modelo SWAT⁽¹⁾.

**Miriam Fernanda Rodrigues⁽²⁾; José Miguel Reichert⁽³⁾; Lilian Alessandra Rodrigues⁽⁴⁾;
Leandro Dalbianco⁽⁵⁾; Jean Paolo Gomes Minella⁽⁶⁾; Rosane Barbosa Lopes
Cavalcante⁽⁷⁾.**

⁽¹⁾ Trabalho executado com recursos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior e da Empresa Celulose Riograndense (CMPC).

⁽²⁾ Doutoranda pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Departamento de Solos; Universidade Federal de Santa Maria; Santa Maria, RS; E-mail: miriamf_rodrigues@yahoo.com.br; ⁽³⁾ Professor titular do Departamento de Solos; Universidade Federal de Santa Maria; Santa Maria, RS; E-mail: reichert@ufsm.br; ⁽⁴⁾ Extensionista rural da Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural (EMATER/ASCAR); Candelária, RS; E-mail: larodrigues@emater.tche.br; ⁽⁵⁾ Técnico em agropecuária; Instituto Federal Farroupilha; Jaguarí, RS; E-mail: agro.dalbianco@gmail.com; ⁽⁶⁾ Professor do Departamento de Solos; Universidade Federal de Santa Maria; Santa Maria, RS; E-mail: jminella@gmail.com; ⁽⁷⁾ Pesquisadora, Celulose Riograndense (CMPC), Guaíba, RS; E-mail: rbcavalcante@cmprcs.com.br.

RESUMO: Modelos matemáticos, de base física, para a representação e predição de processos hidrossedimentológicos são ferramentas adequadas para a gestão dos recursos naturais. Nesses modelos, as propriedades físicas e hídricas do solo exercem influência sobre os processos de infiltração, armazenamento de água no solo e no escoamento superficial. O objetivo desse estudo foi avaliar o potencial do modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT) em representar os limites de disponibilidade de água utilizados para a simulação de processos hidrossedimentológicos de duas bacias hidrográficas florestais embutidas cultivadas com eucalipto no sul do Brasil. O estudo foi realizado em duas bacias hidrográficas florestais embutidas (bacia – 0,94 km² e sub-bacia – 0,39 km²) situadas em Eldorado do Sul-RS. Amostras de solo foram coletadas nos horizontes de 24 perfis distribuídos em cinco classes de solo das bacias para a determinação das propriedades físicas e hídricas utilizadas como dado de entrada para o SWAT. As estimativas da capacidade de campo (CC₁₀, umidade do solo na tensão de 10 kPa e CC₃₃, umidade do solo na tensão de 33 kPa) e do ponto de murcha permanente (PMP, umidade do solo na tensão de 1500 kPa) determinadas em laboratório foram comparadas aos resultados estimados pelas equações do SWAT. A CC₁₀, CC₃₃ e o PMP calculados foram superestimados em média em 23, 27 e 74%, respectivamente, resultados esses que podem proporcionar superestimativa do escoamento e da produção de sedimentos simulados, desde que o modelo não faça compensações hidrológicas por meio do balanço hídrico.

Termos de indexação: capacidade de campo, ponto de murcha permanente, água disponível.

INTRODUÇÃO

Povoamentos de eucalipto têm sido plantados em extensas áreas. Existem incertezas quanto à capacidade dessas áreas em suportar esta espécie florestal exótica, sem que haja comprometimento dos recursos hídricos ou degradação dos solos. Para avaliar os efeitos do cultivo de eucalipto e propor um eficiente planejamento ambiental, estudos que avaliam a dinâmica hidrológica e sedimentológica vêm sendo conduzidos (Rodrigues et al., 2014; Zuluaga, 2014). Com base em resultados do monitoramento hidrológico e sedimentológico, a modelagem matemática para a representação e predição desses processos é uma ferramenta para a gestão dos recursos naturais.

O modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT) é um modelo matemático desenvolvido pelo United States Departamento of Agriculture (USDA/ARS) e pela Texas A&M University. O modelo simula o escoamento superficial, a produção de sedimentos e qualidade da água, sendo uma ferramenta auxiliar para a gestão ambiental de bacias hidrográficas.

O modelo foi originalmente desenvolvido para utilizar as informações de fácil aquisição, exigindo pouca ou nenhuma calibração quando usado em bacias hidrográficas da América do Norte (Arnold et al., 2012). Entretanto, a confiabilidade dos resultados das simulações e das predições do modelo depende da disponibilidade de dados representativos das áreas em estudo. Variações espaciais nos processos hidrológicos da bacia hidrográfica têm efeitos diretos sobre os processos erosivos.

Os resultados das simulações com o modelo SWAT para a evapotranspiração e para o escoamento superficial são, geralmente, satisfatórios (Bonumá et al., 2010). Entretanto, o modelo superestimou a água armazenada no solo



em aproximadamente 50% do valor medido (Cao et al., 2006).

O objetivo desse estudo foi avaliar o potencial do modelo SWAT em representar os limites de disponibilidade de água utilizados para a simulação de processos hidrossedimentológicos de duas bacias hidrográficas florestais embutidas cultivadas com eucalipto no sul do Brasil.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

A área em estudo, denominada como Bacia hidrográfica do horto florestal Terra Dura, pertencente à empresa Celulose Riograndense (CMPC), compreende duas bacias hidrográficas: a principal (0,94 km²) e a sub-bacia embutida (0,39 km²), ambas sob cobertura florestal e situadas na Bacia Hidrográfica do Rio Jacuí, em Eldorado do Sul, na região fisiográfica da Depressão Central do Estado do Rio Grande do Sul, Brasil (**Figura 1**).

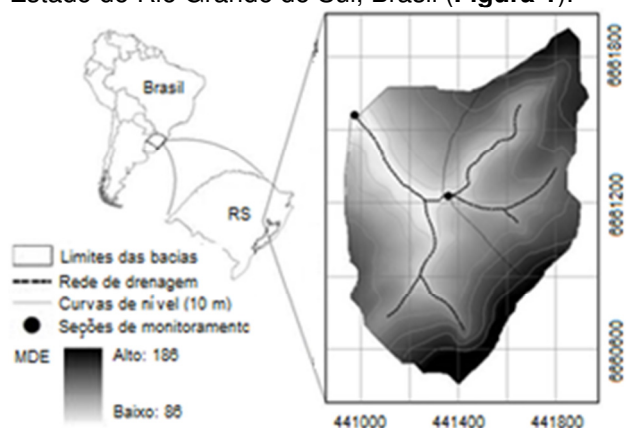


Figura 1 – Localização e caracterização do relevo da bacia e da sub-bacia hidrográfica do horto florestal Terra Dura, Eldorado do Sul-RS.

O clima da região, pela classificação climática de Köppen, é do tipo Cfa - subtropical úmido com verão quente. A precipitação média anual é igual a 1440 mm, com média mensal de 120 mm (Alvares et al., 2013). A erosividade média de longo período das precipitações para a região é de 5813 MJ ha⁻¹ mm⁻¹.

Os solos que ocorrem no local pertencem às classes Argissolo Vermelho, Argissolo Vermelho-Amarelo, Argissolo Amarelo, Cambissolo Háptico e Planossolo Háptico (Costa et al., 2009). A taxa de infiltração de água no solo, de maneira geral, é decrescente das cotas mais elevadas às mais baixas (Rodrigues et al., 2014).

O uso predominante 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.

Propriedades físicas e hídricas do solo

Amostras de solo com estrutura alterada e preservada foram coletadas em 24 perfis das cinco classes de solo para determinar as propriedades do solo utilizadas para representar os limites de disponibilidade de água nas simulações do SWAT.

As amostras de solo com estrutura deformada foram utilizadas para a determinação da granulometria do solo pelo método da pipeta (Embrapa, 1997) modificado (Suzuki et al., 2015) e para determinar a umidade gravimétrica.

As amostras com estrutura preservada foram coletadas em anéis metálicos (0,057 m de diâmetro e 0,04 m de altura). Essas amostras foram preparadas em laboratório, saturadas por capilaridade e submetidas às tensões de 10 kPa em coluna de areia (Reinert & Reichert, 2006) e de 33 kPa em câmara de Richards (Embrapa, 1997). Ao final, as amostras foram mantidas em estufa a 105 °C até atingirem peso constante, para determinação da densidade do solo (Ds) (Embrapa, 1997).

A umidade gravimétrica para a tensão de 1500 kPa foi analisada com psicrômetro (WP4 – Dewpoint Potential Meter), utilizando-se amostras com estrutura deformada (Klein et al., 2006). A umidade gravimétrica determinada foi multiplicada pela Ds correspondente ao horizonte amostrado, para obtenção da umidade volumétrica na tensão de 1500 kPa, considerado como ponto de murcha permanente (PMP). A capacidade de campo (CC) foi considerada como o volume de água retido na tensão de 10 kPa (CC₁₀, umidade a 10 kPa para os solos das bacias) e de 33 kPa (CC₃₃, umidade a 33 kPa considerada no SWAT). A água disponível (AD) foi determinada como sendo o volume de água retido entre a CC e o PMP.

Modelo Soil & Water Assessment Tool (SWAT)

O SWAT é um modelo matemático de parâmetros distribuídos e contínuos (Arnold et al., 1998) largamente utilizado em bacias hidrográficas de diversas regiões do mundo (Gassman et al., 2007), para avaliar e prever o efeito das alterações de uso e manejo do solo sobre a quantidade e qualidade de água. O modelo simula diversos processos físicos de forma sequencial em unidades de resposta hidrológica, que são agrupadas e formadas de acordo com o relevo, o tipo e com o uso do solo.

As simulações são realizadas em duas fases: terrestre e de propagação. Na fase terrestre, o ciclo hidrológico é calculado com base na equação de balanço hídrico (Neitsch et al., 2005), em que a interceptação, a evapotranspiração, a infiltração, o armazenamento e a redistribuição da água no solo e



os escoamentos sub-superficial e superficial são simulados.

O modelo simula o movimento de água no solo somente sob condições saturadas. O fluxo em meio saturado ocorre quando o conteúdo de água supera a capacidade de campo. A água que excede a capacidade de campo fica disponível para percolação, fluxo lateral ou drenagem. O teor de água no ponto de murcha permanente (PMP), no modelo, é estimado pela **Equação 1**.

$$WP_{ly} = 0.40 \frac{m_c \rho_b}{100} \quad (1)$$

em que: WP_{ly} é o teor de água no ponto de murcha permanente ($\text{mm H}_2\text{O mm solo}^{-1}$); m_c é o teor de argila (%); e ρ_b é a densidade do solo (Mg m^{-3}).

O teor de água na capacidade de campo (CC) é estimado pela **Equação 2**.

$$FC_{ly} = WP_{ly} + AWC_{ly} \quad (2)$$

em que: FC_{ly} é o teor de água na capacidade de campo ($\text{mm H}_2\text{O mm solo}^{-1}$); WP_{ly} é o teor de água no ponto de murcha permanente ($\text{mm H}_2\text{O mm solo}^{-1}$); AWC_{ly} é a água disponível ($\text{mm H}_2\text{O mm solo}^{-1}$).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As propriedades físicas dos solos das bacias hidrográficas embutidas, como esperado, possuem comportamento diferente entre horizontes e classes de solo, o que influencia as propriedades hídricas desses solos (**Tabela 1**). A variabilidade dessas propriedades em bacias hidrográficas deve ser considerada para a simulação de processos hidrossedimentológicos com o SWAT, para aumentar o potencial preditivo do modelo.

A CC_{10} , CC_{33} e o PMP calculados foram superestimados em média em 23, 27 e 74%, respectivamente (**Figura 2**). A superestimativa do PMP também faz com que ocorra superestimativa na CC, tendo em vista que o valor de PMP estimado é somado ao valor de AD medido e informado como parâmetro de entrada no modelo. A estimativa do PMP considera apenas a densidade do solo e o teor de argila, entretanto, a matéria orgânica do solo e o tipo de argila também exercem influência sobre o PMP. Como ocorre superestimativa da CC, por consequência do PMP, é provável que ocorra superestimativa de variáveis hidrológicas que geram processos erosivos. No modelo SWAT, o fluxo de água em meio saturado começa quando o conteúdo de água supera a CC. Dessa maneira, se a CC for superestimada, o armazenamento de água no solo também será superestimado e os valores finais de escoamento e produção de sedimentos simulados também podem ser superestimados.

Tabela 1 – Propriedades físicas do solo utilizadas com parâmetros de entrada para o modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT), para as bacias hidrográficas florestais embutidas, Eldorado do Sul-RS.

Hz	Z	Ds	Ag	AD ₁₀	AD ₃₃
Cambissolo Háplico					
Ap	70	1,44	12	0,114	0,074
Bi	540	1,34	68	0,159	0,104
2Ab	820	1,38	55	0,153	0,089
2CAb	1340	1,23	72	0,350	0,326
2Cr	1830	1,37	35	0,258	0,192
Argissolo Amarelo					
Ap	100	1,49	8	0,150	0,147
A2	300	1,47	10	0,180	0,119
AB	520	1,40	12	0,181	0,119
BA	800	1,45	20	0,245	0,177
Bt	1100	1,44	19	0,192	0,104
Btg1	1310	1,58	19	0,148	0,168
Btg2	1500	1,58	27	0,148	0,168
Argissolo Vermelho					
Ap	230	1,65	35	0,209	0,122
BA	360	1,44	62	0,157	0,133
Bt1	770	1,39	66	0,226	0,151
Bt2	1870	1,39	60	0,226	0,227
Argissolo Vermelho-Amarelo					
Ap1	40	1,38	20	0,209	0,190
Ap2	160	1,38	26	0,209	0,190
2Apb	270	1,67	44	0,131	0,101
2AB	430	1,49	34	0,162	0,132
2Bt	1170	1,45	45	0,098	0,078
2BC	2000	1,53	40	0,174	0,137
Planossolo					
Ap	100	1,68	8	0,133	0,076
A1	350	1,49	16	0,131	0,103
E	540	1,61	18	0,181	0,161
Btg	730	1,43	32	0,219	0,195
Bg	1150	1,71	0	0,169	0,149
Cg	1670	1,71	0	0,169	0,149

¹ Hz é o horizonte do perfil de solo; Z é a profundidade do perfil de solo (mm); Ds é a densidade do solo (Mg m^{-3}); Ag é o teor de argila (%); AD₁₀ é a capacidade de água disponível considerando-se a água retida no solo na tensão de 10 kPa (mm mm^{-1}); AD₃₃ é a capacidade de água disponível considerando-se a água retida no solo na tensão de 33 kPa (mm mm^{-1}).

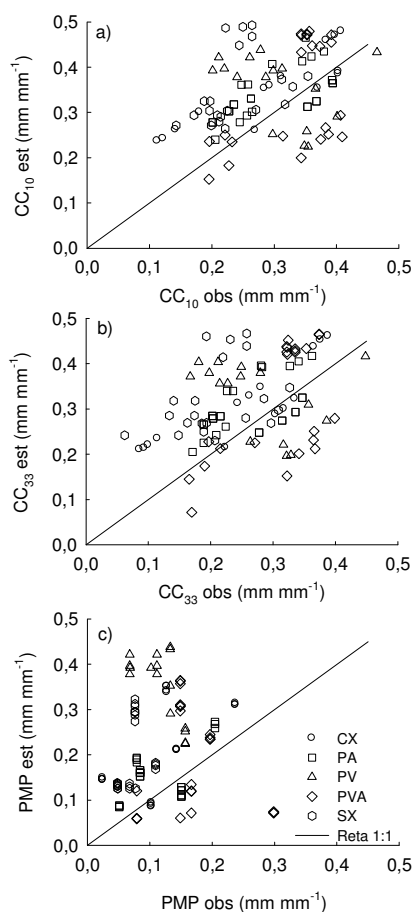


Figura 2 – Capacidade de campo mensurada considerada para a tensão de 10 e 33 kPa (CC_{10} obs; CC_{33} obs) e estimada pelo SWAT (CC_{10} est; CC_{33} est) (a,b) e ponto de murcha permanente mensurado (PMP obs) e estimado pelo SWAT (PMP est) (c) para os solos das bacias hidrográficas florestais embutidas, Eldorado do Sul-RS. ¹CX é Cambissolo Háplico; PA é Argissolo Amarelo; PV é Argissolo Vermelho; PVA é Argissolo Vermelho-Amarelo; SX é Planossolo Háplico (Costa et al., 2009).

Os resultados das simulações serão representativos se ocorrer uma compensação hidrológica nos resultados finais simulados pelo SWAT por meio do balanço hídrico (Cao et al., 2006), com alteração nos valores de evaporação, escoamento, armazenamento no solo e escoamento superficial e subsuperficial. Mesmo que a CC medida seja significativamente menor daquela estimada pelo modelo, é possível que resultados finais de vazão e produção de sedimentos simulados possam ser estatisticamente satisfatórios.

CONCLUSÕES

O modelo SWAT superestimou a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente, resultados

esses que podem proporcionar superestimativa do escoamento e da produção de sedimentos simulados. Contudo, essa limitação pode ser superada por meio de compensação dos demais componentes do balanço hídrico no SWAT.

REFERÊNCIAS

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22:711-728, 2013.

ARNOLD, J. G.; MORIASI, D.; GASSMAN, P.W. et al. SWAT: Model use, calibration, and validation. *T. ASABE*, 55:1491-1508, 2012.

ARNOLD, J. G.; SRINIVASAN, R.; MUTTIAH, R. S. et al. Large area hydrologic modeling and assessment: Part I. Model Development. *Am. Water Res. As.*, 34:73-89, 1998.

BONUMÁ, N. B.; REICHERT, J. M.; MINELLA, J. P. G. et al. Balanço hídrico e sua relação com a modelagem da produção de sedimentos em uma pequena bacia hidrográfica rural. In: IX ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE SEDIMENTOS, 2010, Brasília-DF. Anais. 2010. 420p. p.236.

CAO, W.; BOWDEN, W.B.; DAVIE, T. et al. Multi-variable and multi-site calibration and validation of SWAT in a large mountainous catchment with high spatial variability. *Hydrol. Process.*, 20:1057-1073, 2006.

COSTA, A. M.; CURTI, N.; MENEZES, M. D. et al. Levantamento detalhado de solos da microbacia hidrográfica do horto florestal Terra Dura (RS) e considerações sobre escalas de mapeamento. *Ci. Agrotec.*, 33:1272-1279, 2009.

GASSMAN, P. W.; REYES, M. R.; ARNOLD, J. G. The Soil and Water Assessment Tool: Historical Development, applications, and Future Research Directions. *Am. Soc. Agric. Biol. Eng.*, 50:1211-1250, 2007.

NEITSCH, S.L.; ARNOLD, J. R.; KINIRY, J. R. et al. Soil and Water Assessment Tool - Theoretical Documentation: Version 2005. Temple, Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station, 2005. 494p.

RODRIGUES, M. F.; REICHERT, J. M.; MINELLA, J. P. G. et al. Hydrosedimentology of nested subtropical watersheds with native and eucalyptus forests. *J. Soil Sed.*, 14:1311-1324, 2014.

SUZUKI, L. E. A. S.; REICHERT, J. M.; ALBUQUERQUE, J. A. et al. Dispersion and flocculation of Vertisols, Alfisols and Oxisols in Southern Brazil. *Geoderma Regional*, 5:64-70, 2015.

ZULUAGA, J. J. Hidrologia comparativa em bacias hidrográficas com eucalipto e campo [Tese]. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria; 2014.