

BALANÇO HÍDRICO E SUA RELAÇÃO COM A MODELAGEM DA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS EM UMA PEQUENA BACIA HIDROGRÁFICA RURAL

Nadia Bernardi Bonumá¹; José Miguel Reichert², Jean Paolo Minella³; Cláudia Alessandra Peixoto de Barros⁴; Miriam Fernanda Rodrigues⁵; Diogo Costa Buarque⁶

RESUMO --- No sul do Brasil áreas com floresta nativa vem sendo substituídas por lavouras de fumo, causando alterações no balanço hídrico e aumentando a erosão do solo nessas áreas. Para prever a carga de sedimentos transportados devido às atividades agrícolas é essencial o entendimento dos processos hidrológicos uma vez que a hidrologia é a força primária que controla a dinâmica do transporte de sedimentos. O objetivo deste estudo foi avaliar o balanço hídrico e a produção de sedimentos na bacia hidrográfica do Arroio Lino, localizada no sul do Brasil, utilizando o modelo SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*). Os resultados das simulações da vazão e da produção de sedimentos foram comparados com valores medidos na bacia. A nível mensal obteve-se valores do índice de eficiência de Nash e Sutcliffe (COE) de 0,87 e 0,7; para escoamento e produção de sedimentos, respectivamente; indicando um bom ajuste dos dados simulados comparados aos dados observados. Por meio de uma análise de sensibilidade dos parâmetros pode-se verificar que alguns dos parâmetros que produziram maior efeito na simulação dos processos hidrológicos, como por exemplo, o valor da curva número inicial do método SCS (CN2), também afetaram fortemente os resultados da simulação da produção de sedimentos.

ABSTRACT --- In Southern Brazil, areas with native forest have been replaced by tobacco crops, causing changes in the water balance and increasing the soil erosion in these areas. In order to predict the sediment yield due to agricultural activities the understanding of the hydrological processes is essential as hydrology is the primary driving force of sediment loading dynamic. The objectives of this research was to evaluated the water balance and sediment yield using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) model for the Arroio Lino watershed, located in Southern Brazil. The model simulations were compared against measured streamflow and sediment yield data. For the monthly predictions the values of Nash and Sutcliffe efficiency (NSE) were 0.87 and 0.7, for streamflow and sediment yield, respectively, indicating a good fit of the simulated data compared to the observed data. Through parameter sensitivity analysis can be seen that some of the parameters that produced high effect on the hydrological processes simulation, as the initial SCS Curve Number II value (CN2), also strongly affected the results of sediment yield simulation.

Palavras-Chave: SWAT, análise de sensibilidade, modelos matemáticos.

¹. Doutoranda do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo (PPGCS), Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, RS; nadiabonuma@gmail.com

². Professor Adjunto do Departamento de Solos, Centro de Ciências Rurais, UFSM, Santa Maria, RS: reichert@smail.ufsm.br

³. Professor Adjunto do Departamento de Solos, Centro de Ciências Rurais, UFSM, Santa Maria, RS: jminella@gmail.com

⁴. Mestranda do PPGCS, UFSM, Santa Maria, RS: dinhaufsm@gmail.com

⁵. Mestranda do PPGEF, UFSM, Santa Maria, RS: miriamf_rodrigues@yahoo.com.br

⁶. Doutorando do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, RS; diogo.buarque@gmail.com

1 - INTRODUÇÃO

No sul do Brasil, existem extensas áreas de solo em relevo declivoso com elevada fragilidade aos processos erosivos quando a vegetação é removida. Muitos desses solos são intensivamente utilizados e modificados pelas diversas atividades de exploração agrícola. Os conseqüentes fatores e impactos sócio-ambientais advindos da exploração não planejada carecem ser estudados para melhor compreender a extensão dos efeitos oriundos da degradação do solo e dos recursos hídricos. Possivelmente, os principais fatores são as inadequações de uso, que geram e transferem para águas superficiais os sedimentos desagregados, agrotóxicos e nutrientes.

Os processos de erosão e sedimentação numa bacia hidrográfica podem trazer muitos problemas. Na área agrícola a erosão remove a camada superficial do solo, reduzindo a produtividade. O sedimento é transportado para os corpos d'água, prejudicando a qualidade das águas superficiais, além de servir como veículo a outros poluentes, que são adsorvidos a estes materiais (Paiva, 2003).

A produção de sedimentos caracteriza-se como uma das importantes incógnitas que precisam ser determinadas nas pequenas bacias hidrográficas, estando sua importância associada não só ao aspecto relacionado com a determinação do volume de assoreamento em reservatórios, com estimativa de sua vida útil, mas também ao estudo de práticas agrícolas desenvolvidas na bacia, relacionando-as à perda de solo agrícola.

Para um efetivo controle da erosão é necessário avaliar os fatores que interagem na degradação do solo e da água em escala de bacia hidrográfica. O entendimento do balanço hídrico é crítico uma vez que a hidrologia é a força primária que controla a dinâmica do transporte de sedimentos e nutrientes. Variações temporais e espaciais no comportamento hidrológico da bacia hidrográfica impactam diretamente na produção de sedimentos, considerando que a água atua no processo erosivo, na transferência dos sedimentos da fase terrestre para a rede de drenagem e no transporte/deposição dos sedimentos pelos canais até atingir o exutório da bacia. Vários estudos têm sido feitos utilizando modelos matemáticos para analisar os impactos das alterações no uso do solo sobre o escoamento, produção de sedimentos e qualidade da água.

A simulação da produção de sedimentos e dinâmica dos nutrientes nos corpos d'água pode ser comparada aos dados observados. Os dados obtidos com a simulação podem servir para prever as perdas de solo e a transferência de nutrientes devido ao sistema de manejo utilizado e também para o planejamento ambiental. A modelagem da produção de sedimentos e de nutrientes é essencial para determinar impactos, antes mesmo da utilização na área em questão, de determinada cultura ou prática agrícola. Os resultados desses modelos juntamente com as medidas existentes fornecem pistas para a identificação da origem e natureza da poluição e para a quantificação das suas cargas.

A confiabilidade do resultado do modelo depende, porém, sobretudo da disponibilidade de dados representativos.

O *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) é um modelo desenvolvido pelo *USDA/ARS* e pela *Texas A&M University*. O SWAT simula o escoamento, a produção de sedimentos e a qualidade da água, largamente utilizado na prevenção e no controle da erosão dos solos, da poluição difusa, sendo uma ferramenta auxiliar na gestão ambiental de bacias hidrográficas rurais.

É importante salientar que o modelo foi desenvolvido com base num extenso banco de dados de solos, topografia, culturas, manejo e clima dos Estados Unidos da América. Nesse sentido, quando aplicado em regiões com escassez de dados, e cujas características de solos, plantas e clima divergem da realidade norte-americana, torna-se imprescindível realizar a calibração dos parâmetros. O modelo possui, entretanto, muitos parâmetros e a calibração de cada um deles resultaria em um trabalho árduo e demorado, pois a resposta dada pelo modelo não é igualmente sensível a todas estas variáveis.

Para simular satisfatoriamente a produção de sedimentos utilizando o modelo SWAT, primeiramente deve ser feita a análise do balanço hídrico da bacia e a calibração dos componentes hidrológicos que controlam o aporte de sedimentos. Uma vez que os sedimentos e outros poluentes são transportados pela água, se a resposta hidrológica não for aceitável, os outros processos também não serão. O principal componente hidrológico do modelo é o escoamento superficial, que atua diretamente no transporte de sedimentos, nutrientes e outros contaminantes.

Neste estudo serão avaliados o balanço hídrico e a sua relação com a produção de sedimentos em uma pequena bacia hidrográfica rural aplicando o modelo SWAT. Serão avaliados ainda, quais são os parâmetros do SWAT mais sensíveis na simulação do escoamento superficial e da produção de sedimentos, por meio de uma análise manual de sensibilidade e do uso de um algoritmo que combina os métodos *Latin-Hypercube* e *One-factor-At-a-Time* (LH-OAT) (Van Griensven *et al.*, 2005).

2 - MATERIAL E MÉTODOS

A. Local de estudo

A área de estudo é bacia hidrográfica rural do Arroio Lino, com 3,2 km² de área, localizada no município de Agudo, região central do Estado do Rio Grande do Sul (Figura 1). A bacia do Arroio Lino localiza-se nas cabeceiras do rio Jacuí, principal afluente da Bacia do Guaíba. O relevo do local é fortemente ondulado a escarpado, com declividade média de 12%.

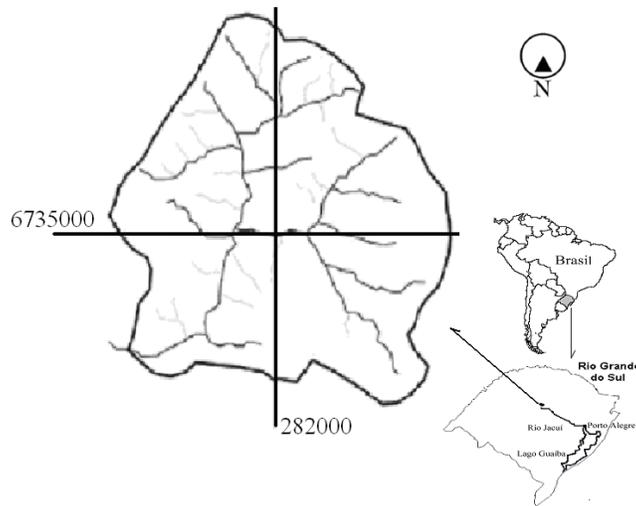


Figura 1 - Localização da bacia hidrográfica do Arroio Lino, em Agudo - RS.

O clima é classificado, segundo Köppen, como Cfb, sub-tropical úmido com verões quentes, inverno com geadas frequentes e precipitação bem distribuída no ano. As principais classes de solos na bacia do Arroio Lino são Neossolo, Chernossolo, Cambissolo, Argissolo e Planossolo.

O local tem por características áreas declivosas e solos frágeis, onde há intensa exploração agrícola, principalmente com a cultura do fumo. O manejo do solo utilizado é parte no sistema tradicional e parte no sistema conservacionista.

B. Modelo SWAT

Para estimativa do escoamento superficial e da produção de sedimentos na bacia hidrográfica do Arroio Lino foram feitas simulações com o modelo SWAT versão 2009 associado a um Sistema de Informações Geográficas (SIG).

O SWAT é um modelo em escala de bacia hidrográfica e sua aplicação requer a entrada dos dados na forma espacializada. A ferramenta do SIG possibilita a subdivisão da bacia hidrográfica em áreas homogêneas (sub-bacias). Cada sub-bacia pode ser parametrizada pelo SWAT usando uma série de Unidades de Resposta Hidrológica (*Hydrologic Response Units – HRU's*), conforme o relevo, tipo de solos e uso da terra.

Na simulação da fase terrestre, o ciclo hidrológico é calculado com base na equação de balanço hídrico (Neitsch *et al.*, 2005):

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_d - Q_{sup} - E_a - w_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

em que: SW_t = quantidade final de água no solo (mm); SW_0 = quantidade inicial de água no solo no dia i (mm); t = tempo (dias); R_d = precipitação no dia i (mm); Q_{sup} = escoamento superficial no dia i (mm); E_a = evapotranspiração no dia i (mm); W_{seep} = percolação no dia i (mm); Q_{gw} = fluxo de

retorno (ascensão capilar) no dia i (mm).

São simulados os seguintes processos hidrológicos: interceptação, infiltração, redistribuição da água no solo, evapotranspiração, escoamentos sub-superficial e superficial, armazenamento, escoamento em canais principais e tributários e vazão de base.

O modelo oferece três opções para a estimativa da evaporação potencial: Penman & Monteith (1965), Hargreaves & Samani (1985) e Priestley & Taylor (1972).

O escoamento superficial pode ser calculado através de uma modificação do método do Soil Conservation Service (SCS) ou pelo método de infiltração de Green & Ampt. Neste trabalho foi escolhido o método do SCS utilizando dados de precipitação diários.

O volume de escoamento superficial calculado usando o método da Curva Número do SCS (USDA, 1972) é dado por:

$$Q = \frac{(R - 0,2s)^2}{R + 0,8s}, R > 0,2s \quad (2)$$

$$Q = 0, R \leq 0,2s \quad (3)$$

em que: Q : escoamento superficial diário (mm); R : precipitação diária (mm); s : parâmetro de retenção (mm).

O parâmetro de retenção varia de acordo com: (i) a sub-bacia, em função do solo, uso do solo e declividade e (ii) com o tempo, em função das alterações de umidade do solo. Este parâmetro está relacionado com a curva número (CN) pela seguinte equação:

$$s = 254 \left(\frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (4)$$

O CN é definido de acordo com o tipo hidrológico do solo, classificado em A, B, C ou D, com base nas características do solo; condição antecedente de umidade do solo e declividade do terreno.

O SWAT realiza o cálculo dos componentes do escoamento recorrendo a equação do balanço hídrico (1) e aos modelos de fluxo adaptados às condições de escoamento superficial, subsuperficial e subterrâneo. Estes volumes de água são seguidamente conduzidos até à rede de drenagem e ao longo desta até ao ponto mais a jusante da bacia hidrográfica no qual é contabilizado o valor total de produção de água.

A produção de sedimento é computada para cada HRU com a MUSLE (*Modified Universal Soil Loss Equation*):

$$sed = 11,8 \cdot (Q_{sup} \cdot q_p \cdot area_{hru})^{0,56} \cdot K \cdot C \cdot P \cdot LS \cdot CRFG \quad (5)$$

em que: sed = produção de sedimento (t); Q_{sup} = escoamento de superfície (m^3); q_p = taxa de

escoamento de pico ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$); area^{hru} = área da HRU (ha); K = fator de erodibilidade do solo; C = fator de uso e manejo do solo; P = fator de práticas conservacionistas; LS = fator topográfico; CFRG = fator de fragmento grosseiro.

Para a entrada de dados no modelo, necessita-se de informações cartográficas, como o Modelo Numérico do Terreno, tipo de solos e uso do solo, além de dados climáticos, hidrossedimentológicos e de qualidade da água. Os principais dados de solo necessários são: densidade do solo, capacidade de água disponível no solo, condutividade hidráulica saturada, conteúdo de carbono orgânico do solo, textura, albedo, condutividade elétrica e erodibilidade. Grande parte desses dados já havia sido obtida na área de estudo, que está sob monitoramento desde 2001 (Dalmolin *et al.* 2004; Gonçalves & Rheinheimer, 2005; Kaiser, 2006; Pellegrini, 2006; Pellegrini *et al.*, 2008; Rheinheimer, 2003; Sequinato, 2007). Os demais dados de entrada necessários foram obtidos por meio de coletas e análises de solo que foram realizadas durante o andamento dessa pesquisa.

O modelo permite a utilização de dados de clima observados ou valores gerados pelo modelo durante a simulação. As variáveis climáticas requeridas pelo SWAT são valores diários de precipitação, temperatura máxima e mínima do ar, radiação solar, velocidade do vento e umidade relativa. As séries climáticas foram obtidas a partir de dados coletados na Estação Climatológica da UFSM, pertencente à rede do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e localizada na Latitude Sul $29^\circ 42'$ e Longitude Oeste $53^\circ 42'$. A densidade de fluxo de radiação solar global incidente foi estimada a partir dos dados de insolação pela equação de Angstrom com coeficientes mensais para Santa Maria apresentados em Estefanel *et al.*, (1990).

Os dados de precipitação do período de simulação foram obtidos a partir de uma micro-estação meteorológica e de cinco pluviômetros localizados dentro da bacia (Kaiser, 2006; Sequinato, 2007). Os dados de vazão através de um linígrafo que registrava de forma automática a altura da lâmina de água na bacia. A amostragem de água e sedimentos em suspensão foram obtidas a partir de coletas manuais durante eventos pluviométricos em um posto hidrossedimentométrico no exutório da bacia (Sequinatto, 2007).

C. Análises estatísticas

Para a comparação entre os dados simulados pelo modelo e os dados medidos foram utilizadas algumas ferramentas estatísticas o uso do coeficiente de determinação (r^2), do índice de eficiência de Nash e Sutcliffe (COE) (Nash & Sutcliffe, 1970) e da porcentagem BIAS (PBIAS).

O índice de eficiência de Nash-Sutcliffe foi utilizado com a finalidade de avaliar a eficiência do modelo em simular determinada variável. O COE pode variar a partir de $-\infty$ a 1, sendo 1 indicativo

de um perfeito ajuste dos dados simulados em relação aos dados medidos:

$$COE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_m^{obs})^2} \right] \quad (6)$$

em que: Y^{obs} é o valor medido; Y^{sim} é o valor simulado pelo modelo; Y_m^{obs} é a média dos valores medidos no período de simulação.

A porcentagem BIAS (PBIAS) avalia a tendência geral que os dados simulados mostram em subestimar (valores PBIAS positivos) ou superestimar (valores PBIAS negativos) os dados medidos (Gupta *et al.* 1999):

$$PBIAS = \sum_{i=1}^n \frac{(Y_i^{obs} - Y_i^{sim}) * 100}{\sum_{i=1}^n Y_i^{obs}} \quad (7)$$

em que: PBIAS é o desvio dos valores simulados (Y^{sim}) em relação aos valores medidos (Y^{obs}), expresso em porcentagem.

Com o objetivo de avaliar o desempenho do modelo Green & van Griensven, (2008) e Wu & Chen (2009) usaram como padrão valores de $COE > 0.4$ e $r^2 > 0.5$. Santhi *et al.*, (2001) assumiram que para simulações mensais valores de $COE > 0.5$ e $r^2 > 0.6$ o desempenho do modelo seria aceitável. De acordo com Moriasi *et al.*, (2007) as simulações do modelo podem ser julgadas como satisfatórias se $COE > 0.50$, e se $PBIAS \pm 25\%$ para escoamento e se $PBIAS \pm 55\%$ para sedimentos. Neste estudo, $r^2 > 0.6$, $COE > 0.50$ e $PBIAS \pm 25\%$ foram adotados como padrão para as simulações serem consideradas satisfatórias.

D. Análise de sensibilidade

Para identificar quais parâmetros são mais sensíveis na calibração do escoamento superficial e aporte de sedimentos foi feita a análise manual de sensibilidade e foi utilizado um algoritmo que combina dois métodos de análise de sensibilidade: *Latin-Hypercube* (LH) e *One-factor-At-a-Time* (OAT) (Van Griensven *et al.*, 2005).

A técnica LH é baseada no método estatístico de simulação estocástica Monte Carlo, que utiliza a redução de variância como a amostragem estratificada para melhorar a eficiência computacional. Este subdivide a distribuição de cada parâmetro em N escalas, cada um com a probabilidade de ocorrência igual a $1/N$. São gerados valores randômicos dos parâmetros tal que cada variação é amostrada somente uma única vez. O modelo roda N vezes com a combinação randômica dos parâmetros.

O método OAT é um método de integração de sensibilidade do local para o global, no qual, em cada simulação, somente um fator é mudado por vez. Assim, com as mudanças no resultado em

cada loop, o modelo pode encontrar a solução para as ambiguidades que são atribuídas ao parâmetro de contribuição que foi alterado.

O método combinado LH-OAT opera por loops, em cada loop é calculado o efeito parcial da variação do parâmetro, e o efeito final é a média desses efeitos parciais. O número de simulações requerido é:

$$N_s = N * (P + 1) \quad (8)$$

em que: N_s é o número de simulações; N é o número de intervalos; P é o número de parâmetros.

3 - RESULTADOS

Balanço hídrico

As simulações foram realizadas para o período de janeiro de 2002 a dezembro de 2005. A Tabela 1 lista as médias anuais simuladas dos principais componentes do balanço hídrico da bacia do Arroio Lino para o período simulado. Os principais componentes do balanço hídrico considerados pelo modelo SWAT são: a quantidade total de chuva que precipita sobre a área da bacia durante o tempo de simulação (PREC), a evapotranspiração real da bacia (ET), e o volume de água que é propagado pelos canais da rede de drenagem até o exutório da bacia (produção de água ou *water yield*) (WY). A produção de água inclui as contribuições do escoamento superficial (SURQ), do escoamento sub-superficial (água que flui lateralmente pelo perfil de solo e entra no canal) (LATQ) e do escoamento subterrâneo (água que retorna do aquífero raso e entra no canal) (GWQ) menos as perdas: água armazenada no solo nas HRU's (SW) ou percolada (PERCO) no solo e que se torna recarga do aquífero.

Tabela 1 – Principais componentes do balanço hídrico simulados.

Período	PREC	SURQ	LATQ	GWQ	PERCO	SW	ET	PET	WY
	-----mm-----								
2002	2471,4	905,55	757,47	331,78	332,2	95,44	474,36	875,15	1991,95
2003	1482,6	508,43	416,22	121,69	120,85	90,66	441,89	892,56	1044,29
2004	990,2	235,61	310,88	51,02	51,94	71,33	409,87	937,96	595,74
2005	1508,9	422,31	480,51	120,85	120,07	94,59	458,44	998,21	1021,43
Media	1613,28	517,975	491,27	156,34	156,27	88,01	446,14	925,97	1163,35

Embora o período de tempo analisado seja curto, é possível notar que existe uma variabilidade interanual de precipitação. No período analisado, foram classificados como *El Niño* os anos de 2002/2003 e 2004/2005; e como neutros, 2003/2004 e 2005/2006 (National Oceanic and Atmospheric Administration, 2009). Esta variabilidade interanual das chuvas que pode estar

associada com fenômenos climáticos como o *El Niño*, acaba interferindo na magnitude dos valores dos outros componentes do ciclo hidrológico e também na produção de sedimentos.

A evapotranspiração potencial (PET) foi estimada usando a equação de Penman–Monteith (Monteith 1965). Os dados de evaporação potencial mensais simulados foram comparados como os dados de evaporação média medida no tanque Classe A (ECA, mm dia⁻¹) na estação climatológica da UFSM, pertencente à rede do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Conforme a figura xx pode-se perceber que os dados de evaporação potencial simulados seguem a tendência dos dados de evaporação média medida no tanque Classe A, entretanto nos meses temperaturas mais altas, de novembro a março, os valores medidos no tanque Classe A foram bem superiores aos valores simulados. A evapotranspiração real (ET) foi obtida a partir da multiplicação da evapotranspiração potencial por um coeficiente de proporcionalidade ou coeficiente de cultura, de acordo com o uso do solo e baseado na simulação do crescimento das plantas (Neitsch *et al.* 2005). Os resultados simulados indicam que em média 30% da precipitação anual é perdida por evapotranspiração na bacia, havendo variação de ano para ano no período analisado. A variabilidade interanual da evaporação também pode ser justificada por fenômenos como o *El Niño* que ocorrem na região estudada (Streck *et al.*, 2008).

O escoamento de base foi separado escoamento superficial usando a técnica do filtro digital automático (Arnold & Allen, 1999). Esta técnica estimou que 59% do escoamento total anual medido é escoamento de base. Em comparação, o escoamento de base representou 58% do escoamento total simulado.

Escoamento superficial e produção de sedimentos

Os dados de vazão e produção de sedimentos medidos no exutório da bacia no período de janeiro a dezembro de 2005 foram utilizados para calibração e os dados medidos de janeiro a dezembro de 2004 para validação do modelo. O período de janeiro de 2002 a dezembro de 2003 serve como um período de *warm up* do modelo. Ferramentas estatísticas, incluindo o coeficiente de determinação (r^2), o índice de eficiência de Nash e Sutcliffe (COE) e a porcentagem BIAS (PBIAS), foram computadas para os resultados da simulação, para determinar a eficiência do modelo.

A tabela 2 mostra os valores do escoamento e da produção de sedimentos simulados e medidos para os períodos de calibração e validação. O modelo subestimou em pouco menos de 10% os valores do escoamento, entretanto superestimou em cerca de 15% os valores de produção de sedimentos.

Tabela 2 – Valores do escoamento e da produção de sedimentos simulados e medidos.

Período	Precipitação (mm)	Escoamento (mm)		Sedimentos (ton ha ⁻¹)	
		Medido	Simulado	Medidos	Simulados
Validação	990.2	685.01	595.74	10.64	12.61
Calibração	1508.9	1109.65	1021.43	17.41	19.83
Média	1249.55	897.33	809.00	14.03	16.22

O modelo SWAT apresentou boa capacidade de reproduzir a vazão escoada na bacia do Arroio Lino. A figura 2 mostra os dados de vazão mensais simulados em comparação com os dados medidos, houve períodos em que a produção de sedimentos foi superestimada em relação aos dados observados e, em outros, subestimada. O ajuste a nível mensal resultou em um coeficiente de determinação (r^2) de 0,90; acima do padrão 0,6 adotado neste trabalho. Baseado em Moriasi *et al.*, (2007), o desempenho do modelo foi "muito bom", esta avaliação é suportada pelo índice de eficiência de Nash e Sutcliffe (COE) de 0,87 ($> 0,75$) e pelo PBIAS de -8.4% ($< \pm 10\%$).

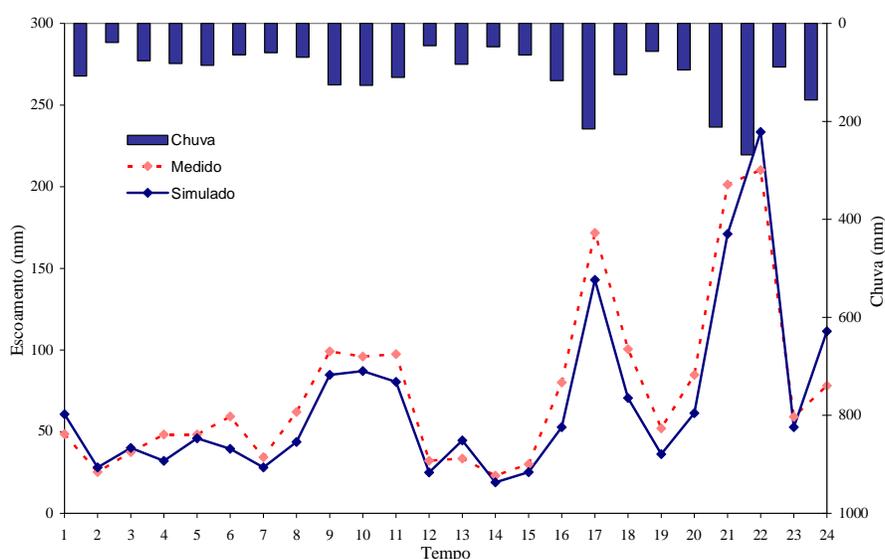


Figura 2 - Valores mensais de precipitação, vazão observada e simulada na bacia do Arroio Lino.

Por outro lado, o ajuste a nível diário apresentou um valor de r^2 de 0,74 ($r^2 > 0,6$). Os coeficientes estatísticos COE e PBIAS foram 0,55 ($> 0,5$) e -11,1%, respectivamente, indicam que o modelo teve desempenho “satisfatório” na simulação diária, baseado no critério de classificação de Moriasi *et al.* (2007).

O diagrama de dispersão entre a produção de sedimentos simulada e observada é apresentado na figura 3. Os valores mensais da produção de sedimentos simulados tiveram uma boa correlação com os valores medidos, sendo o valor de r^2 entre as variáveis de 0,77. O ajuste a nível mensal

apresentou um índice de eficiência de Nash e Sutcliffe (COE) de 0,7 ($COE \leq 0.75$) e PBIAS de 14% ($PBIAS < \pm 15\%$), sendo considerado como “bom”. Entretanto, o ajuste a nível diário apresentou um coeficiente r^2 de 0,57 ($r^2 < 0.6$), um COE de -0,33 e PBIAS de 19% ($> \pm 15\%$) sendo considerado como "insatisfatório", pelo critério de Moriasi *et al.* (2007). As estatísticas calculadas mostraram desempenho bem inferior das simulações diárias de sedimentos do que aquelas obtidas para os períodos mensais.

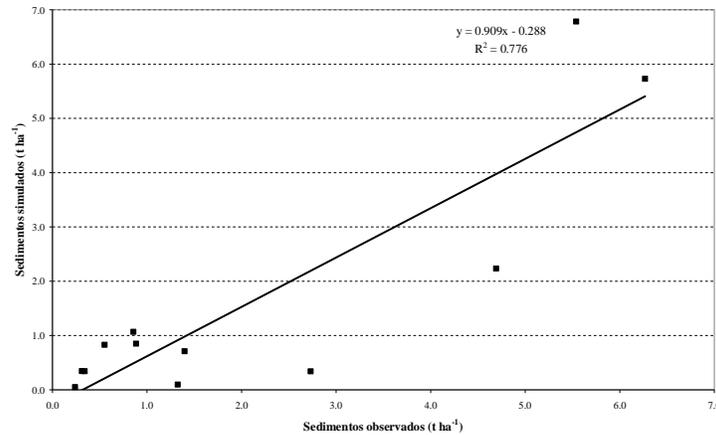


Figura 3 - Diagrama de dispersão entre a produção de sedimentos observada e simulada na bacia do Arroio Lino.

Na bacia hidrográfica do Ribeirão Martins (SP) (Machado & Vettorazzi, 2003) obtiveram um COE de 0,83 e um r^2 de 0,92 na simulação da produção de sedimentos pelo modelo SWAT, após a calibração.

Análise de sensibilidade dos parâmetros

Foi realizada a análise de sensibilidade de 32 parâmetros do modelo SWAT, totalizando 660 simulações. Os efeitos finais da variação dos parâmetros foram ranqueados sendo que o maior efeito (maior sensibilidade) obteve rank 1. Foram feitos 2 ranqueamentos dependendo da função objetiva utilizada: a) soma dos quadrados dos resíduos entre valores de vazão simulados e medidos (SQR1); b) soma dos quadrados dos resíduos entre valores de sedimentos simulados e medidos (SQR2). A Tabela 1 mostra os resultados dos parâmetros que mostraram alguma sensibilidade.

Em relação aos efeitos na variável vazão (SQR1), dos 32 parâmetros analisados, 20 apresentaram alguma sensibilidade. A falta de efeito dos outros 12 parâmetros reside no fato de que alguns deles estão diretamente relacionados com o cálculo de sedimentos e outros estão relacionados aos processos de derretimento de neve. O parâmetro cuja variação apresentou maior sensibilidade foi o Valor da curva número do método SCS (CN2). O CN2 é um parâmetro chave do método SCS,

aumento nos valores de CN2 implicam em aumento no escoamento superficial. O segundo parâmetro com maior efeito foi o Fator de compensação da evaporação do solo (ESCO), observou-se que pequenas variações no ESCO implicam em alterações no balanço hídrico da bacia. O terceiro parâmetro de maior sensibilidade foi o Fator alfa do fluxo de base (Alpha_Bf). Análises similares feitas em outras bacias mostraram que os parâmetros CN2 e Alpha_Bf também tem grande importância na simulação de qualidade da água (VAN GRIENSVEN et al., 2005).

Em relação a variável produção de sedimentos (SQR2), dos 32 parâmetros analisados, 22 apresentaram alguma sensibilidade. Além dos parâmetros de neve, os parâmetros relacionados ao escoamento subterrâneo não tiveram efeito significativo. O parâmetro com maior sensibilidade no cálculo de sedimentos foi o Fator de práticas conservacionistas (USLE_P), seguido do CN2, que influencia o cálculo da vazão de pico. A figura 4 mostra a variação nos valores de escoamento superficial e sedimentos simulados com valores de CN2 variando de -10% a +10% do valor default usado no modelo SWAT. Pode-se perceber que os valores de escoamento superficial e sedimentos simulados têm a mesma tendência de aumentar quando são utilizados valores mais elevados de CN2. O terceiro parâmetro com maior efeito é a Declividade média mais acentuada (SLOPE), que influencia na determinação do LS. Os três parâmetros mais sensíveis são relacionados a fatores da MUSLE, isto demonstra a importância da determinação apurada de cada um deles. Cada salientar que o parâmetro SLOPE também tem efeito direto na vazão de pico, já que contribui na determinação do tempo de concentração da bacia. A figura 5 ilustra que os parâmetros que produzem maior efeito na simulação do escoamento (SQR1) também exercem efeito considerável na simulação do escoamento superficial (SQR2). Isto demonstra a importância de realizar a calibração dos sedimentos e do escoamento de forma iterativa.

Tabela 3. Rank de sensibilidade dos parâmetros em relação à simulação do escoamento (SQR1) e da produção de sedimentos (SQR2).

Parâmetro	Descrição	SQR1	SQR2
Alpha_Bf	Fator alfa do fluxo de base (dias)	3	16
Biomix	Eficiência da mistura biológica	32	15
Blai	Índice máximo de área foliar	5	11
Canmx	Armazenamento máximo de água no dossel vegetativo (mm)	8	5
Ch_K2	Condutividade hidráulica efetiva no canal (mm ano ⁻¹)	4	17
Ch_N2	Coefficiente de Manning (n) do canal	12	13
CN2	Valor da Curva Número inicial do método SCS	1	2
Epc0	Fator de compensação de retirada das plantas	14	8
Esco	Fator de compensação da evaporação do solo	2	6
Gw_Delay	Retardo do escoamento subterrâneo	16	21
Gw_Revap	Coefficiente de re-evaporação da água subterrânea	17	32
Gwqmn	Profundidade de água no aquífero raso para ocorrer fluxo de	6	22

	retorno(mm)		
	Profundidade da água no aquífero raso para ocorrer percolação		
Revapmn	(mm)	15	32
Slope	Declividade média mais acentuada ($m m^{-1}$)	9	3
Slsbbsn	Comprimento da declividade média ($m m^{-1}$)	19	4
Sol_Al	Albedo do solo	18	20
Sol_Awc	Capacidade de água disponível ($mm H_2O mm solo^{-1}$)	10	10
Sol_K	Condutividade hidráulica saturada ($mm h^{-1}$)	7	14
Sol_Z	Profundidade do solo (mm)	11	9
Spcon	Parâmetro linear para o cálculo da rotina de sedimentos no canal	32	18
Spexp	Parâmetro exponencial para o cálculo da rotina de sedimentos no canal	32	19
Surlag	Tempo de retardo do escoamento superficial	13	7
Usle_C	Fator de uso e manejo do solo (MUSLE)	32	12
Usle_P	Fator de práticas conservacionistas (MUSLE)	20	1

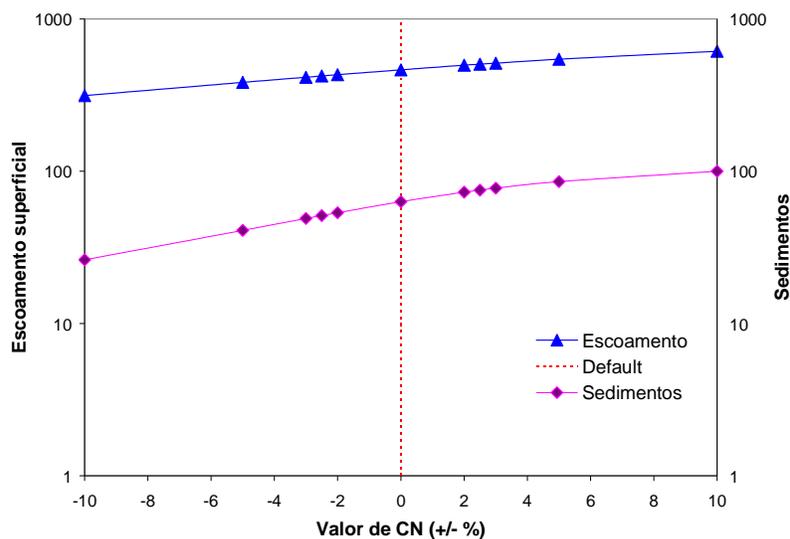


Figura 4 – Variação nos valores de escoamento superficial e sedimentos simulados com diferentes valores de CN.

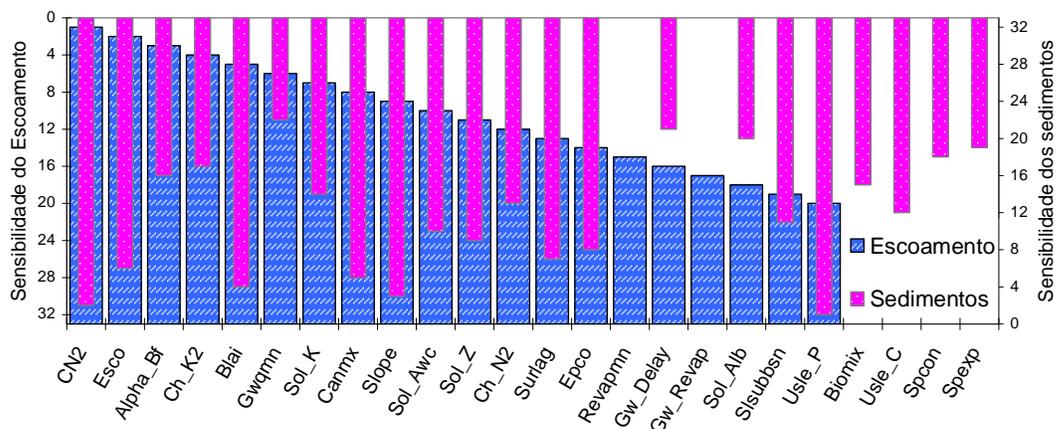


Figura 5 – Comparação entre o efeito dos parâmetros em relação à simulação do escoamento (SQR1) e da produção de sedimentos (SQR2).

4 – CONCLUSÕES

Foram avaliados o balanço hídrico e da produção de sedimentos por meio do modelo SWAT na bacia hidrográfica do Arroio Lino. A simulação do escoamento superficial teve um desempenho “muito bom” a nível mensal e “bom” a nível diário, segundo critério de Moriasi *et al.*, (2007). Em relação à simulação da produção de sedimentos apesar de não se ter obtido ajuste satisfatório em termos diários, observa-se que a nível mensal o desempenho do modelo ($r^2 = 0,77$, COE = 0,7 e PBIAS = 14%) pode ser classificado como “bom”.

Dentre outros fatores um dos motivos pelos qual o desempenho da simulação da produção de sedimentos a nível diário foi insatisfatório é de que o processo de calibração de sedimentos foi feito de forma iterativa em relação à calibração hidrológica, e uma vez que a série fluviográfica de dados medidos era curta isso acabou dificultando a calibração dos parâmetros.

Foi feita a análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo SWAT. Os parâmetros CN2, ESCO e Alpha_Bf mostraram ter grande importância na simulação do escoamento, e consequentemente no aporte de sedimentos e qualidade da água. Como a produção de sedimentos é determinado pela MUSLE, os parâmetros de maior efeito são aqueles relacionados aos fatores da MUSLE. Pode-se verificar que alguns dos parâmetros que produziram maior efeito na simulação dos processos hidrológicos, como por exemplo, o valor da curva número inicial do método SCS (CN2), também afetaram fortemente os resultados da simulação da produção de sedimentos.

Este trabalho está em andamento, sendo que nas próximas etapas buscar-se-à utilizar outros procedimentos de calibração automática que possibilitem um melhor ajuste. Outra medida a ser tomada é a inserção de modificações no algoritmo do SWAT de forma a permitir uma simulação da

produção de sedimentos mais adequada às condições de relevo declivoso da bacia estudada, que poderão futuramente ser utilizadas em outras bacias de características semelhantes.

O modelo SWAT possui grande potencial de utilização com sucesso no Brasil, entretanto a confiabilidade dos resultados do modelo depende muito da qualidade dos dados de entrada. O conhecimento dos processos físicos envolvidos, bem como do efeito dos parâmetros na simulação contribui para diminuir incertezas e aumentar a confiabilidade na geração de cenários alternativos de uso e manejo do solo que podem auxiliar na gestão ambiental de bacias hidrográficas.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos aos pesquisadores da Texas A&M University e ao Dr Jeff Arnold e equipe (ARS/USDA) pelos esclarecimentos em relação ao SWAT. Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelas bolsas concedidas. Ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) pelos dados de clima. Ao professor Gustavo Merten e equipe pelas contribuições em relação ao estudo de balanço hídrico do modelo. E a Dra Letícia Sequinatto e ao doutorando André Copetti, pelo auxílio na obtenção dos dados da bacia do Arroio Lino.

BIBLIOGRAFIA

- ARNOLD, J.G., ALLEN, P.M., 1999. Automated methods for estimating baseflow and groundwater recharge from stream flow records. *J. American Water Resources Association* 35(2):411- 424.
- DALMOLIN, R.S.D; PEDRON, F.A.; AZEVEDO, A.C.; ZAGO, A. 2004. Levantamento semidetalhado de solos da microbacia do Arroio Lino - Município de Agudo (RS). Santa Maria – RS. 84p.
- ESTEFANEL, V. et al. 1990. Insolação e radiação solar em Santa Maria, RS: I – Estimativa da radiação solar global incidente a partir dos dados de insolação. *Revista do Centro de Ciências Rurais*, v.20, n.3-4, p.203-218.
- GONÇALVES, C.S.; RHEINHEIMER, D. dos S. 2005. Qualidade da água numa microbacia hidrográfica de cabeceira situada em região produtora de fumo.. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. Campina Grande, v. 49, n. 3, p. 391-399.
- GREEN, C.H.; VAN GRIENSVEN, A., 2008. Autocalibration in hydrologic modeling: Using SWAT2005 in small-scale watersheds. *Environmental Modelling & Software*. 23, Issue 4, 422-434.
- GUPTA, H.V., SOROOSHIAN, S. AND YAPO, P.O. 1999. Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with m multilevel expert calibration. *J. Hydrologic Eng.* 4(2): 135-143.

- KAISER, D.R. Nitrate na solução do solo e na água de fontes para consumo humano numa microbacia hidrográfica produtora de fumo. 2006. 114f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.
- MACHADO, R.E.; VETTORAZZI, C.A. 2003. Simulação da produção de sedimentos para a microbacia hidrográfica do Ribeirão dos Marins (SP). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v.27, p.735-741.
- MORIASI, D.N., ARNOLD, J.G., VAN LIEW, M.W., BINGNER, R.L., HARMEL, R.D., VEITH, T.L. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*. 50(3): 885-900.
- NASH, J.E.; SUTCLIFFE, J.V. 1970. River flow forecasting through conceptual models. Part 1: a discussion of principles. *Journal of Hydrological*, v. 10(3), p. 282-290.
- NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. ENSO: cold and warm episodes by season. Washington: NOAA, 2009. Disponível em: <http://www.cpc.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml>. Acesso em: 20 dez. 2009.
- NEITSCH, S.L.; ARNOLD, J.G.; KINIRY, J.R.; WILLIAMS, J.R. 2005. Soil and Water Assessment Tool - Theoretical Documentation: Version 2005. Temple, Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment Station, 494p.
- PAIVA, E.M.C.D. 2003. Métodos de estimativa da produção de sedimentos em pequenas bacias hidrográficas. In: *Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas*. Org. PAIVA, E.M.C.D.; PAIVA, J.B.D. Porto Alegre: ABRH.p. 493-506.
- PELLEGRINI, A. 2006. Sistemas de cultivo da cultura do fumo com ênfase às práticas de manejo e conservação do solo. 88f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria - RS.
- PELLEGRINI, J.B.R.; RHEINHEIMER, D.S.; GONÇALVES, C.S.; COPETTI, A.C.; BORTOLUZZI, E.C. 2008. Adsorção de fósforo em sedimentos e sua relação com a ação antrópica. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 32, p. 2639-2646.
- RHEINHEIMER, D.S. (ed). 2003. Caracterização física, química e biológica dos solos na microbacia hidrográfica do Arroio Lino, Nova Boemia, Agudo – RS. Ano II. 115p.
- SEQUINATTO, L. 2007. A insustentabilidade do uso do solo com fumicultura em terras declivosas. Dissertação (Mestrado) – PPGCS - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria.
- SANTHI, C., ARNOLD, J.G., WILLIAMS, J.R., DUGAS, W.A., SRINIVASAN, R., HAUCK, L.M. 2001. Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. *J. Am. Water Resour. Assoc.* 37(5): 1169–1188.

- STRECK, N.A.; ROSA, H.T.; WALTER, L.C.; BOSCO, L.C.; LAGO, I.; HELDWEIN, A.B. 2008. O fenômeno El Niño Oscilação Sul e a variabilidade interanual da evaporação do tanque Classe A e da umidade relativa do ar em Santa Maria, RS. *Ciênc. rural*;38(5):1452-1455.
- VAN GRIENSVEN, A., FRANCOS, A., BAUWENS, W. 2002. Sensitivity analysis and autocalibration of an integral dynamic model for river water quality. *Water Sci. Technol.* 45, 325-332.
- VAN GRIENSVEN, A.; MEIXNER, T.; GRUNWALD, S.; BISHOP, T.; DILUZIO, M.; SRINIVASAN, R. 2005. A global sensitivity analysis tool for the parameters of multi-variable catchment models. *Journal of Hydrology.* 1-14.
- WU, Y., CHEN, J. 2009. Simulation of nitrogen and phosphorus loads in the Dongjiang River basin in South China using SWAT. *Front. Earth Sci. China.* 1-6.