

AVALIAÇÃO DO ARCMUSLE PARA ESTIMATIVA DA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO ALTO RIO NEGRO, REGIÃO SUL BRASILEIRA

Evaluation of ArcMUSLE model to prediction of sediment yield in the Upper Rio Negro watershed, southern Brazil

**Gilson Bauer Schultz
Cesar Augusto Crovador Siefert
Irani dos Santos**

**Universidade Federal do Paraná
Programa de Pós-Graduação em Geografia**

Laboratório de Hidrogeomorfologia (LHG/UFPR). Av. Francisco H. dos Santos, s/n - Centro Politécnico - Bloco 5, sala PH14 - Jardim das Américas - Curitiba - PR - CEP 81531-990 - Caixa Postal 19001.

gilsonb.schultz@gmail.com; {cesarsiefert; irani}@ufpr.br

RESUMO

A erosão hídrica é um dos principais processos causadores de degradação do solo em ambientes tropicais. Este processo ocorre a partir da interação entre fatores hidrológicos, geomorfológicos e pedológicos, causando a desagregação e transporte de partículas. A partir do entendimento do processo torna-se viável a aplicação de modelos matemáticos para estimar a produção de sedimentos em bacias hidrográficas. Este trabalho teve como objetivo principal aplicar a Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE) para simular um evento de precipitação e avaliar o ajuste da simulação aos dados de transporte total de sedimentos medidos. A MUSLE é um modelo determinístico, empírico e originalmente concentrado, formulado a partir da substituição do fator erosividade da chuva por um fator de escoamento superficial que permite simular a produção de sedimentos em eventos isolados de precipitação. Além dos efeitos do escoamento, o modelo considera os fatores de erodibilidade do solo (K), comprimento de rampa e declividade (LS), uso e manejo do solo (P) e práticas conservacionistas (C) para realização da simulação. Foi utilizado o modelo ArcMUSLE integrado a um Sistema de Informações Geográficas (SIG) que permite estimar, de forma totalizada para eventos isolados, o escoamento superficial e a produção de sedimentos de forma espacialmente distribuída. O modelo foi aplicado na bacia hidrográfica do Alto Rio Negro, localizada entre as coordenadas 25°55'S e 26°14'S, 48°56'W e 49°23'W, com área de drenagem de 788 km². Para o evento simulado, com precipitação total de 60mm, os resultados demonstraram que o modelo superestimou tanto o volume total de escoamento superficial como o transporte total de sedimentos. Apesar de o modelo superestimar a geração de escoamento superficial e produção de sedimentos em relação aos dados observados em 8,81% e 30,02%, respectivamente, os resultados permitiram verificar a variabilidade espacial do fenômeno e localizar áreas onde ocorre maior produção de sedimento na bacia hidrográfica.

Palavras chave: Produção de sedimentos. ArcMUSLE. Modelagem distribuída.

ABSTRACT

Water erosion is one of the main processes which cause soil degradation in tropical environments. This process occurs by the interactions between hydrological, geomorphological and pedological factors that cause the detachment and transport of particles. Through process understanding it is possible to make use of mathematical models in order to estimate the sediment yield in watersheds. The main objective of this paper is to apply the Modified Universal Soil Loss Equations (MUSLE) to simulate a rainfall event and evaluate the fit of this simulation to the measured data of sediment transport. MUSLE is a deterministic, empiric and originally lumped model that replaces the rainfall erosivity factor by the overland flow factor to simulate sediment yield in individual rainfall events. In addition to overland flow effects, the model considers the soil erodibility factor (K), hillslope length and steepness (LS), crop and management factor (P) and

the erosion control practice factor (C) to perform simulations. The ArcMUSLE model was used integrated with a Geographical Information System (GIS) allowing an estimate, entirely for isolated events, of the overland flow and the sediment yield through a spatially distributed form. The model was applied to the Upper Negro River watershed, located between the geographic coordinates 25°55'S and 26°14'S, 48°56'W and 49°23'W, and drains an area of 788km². For the simulated event, with total rainfall of 60mm, results showed that both, overland flow and sediment transport, were overestimated by the model. Although the overland flow and the sediment yield simulated were, respectively, 8,81% and 30,02% higher than measured data, the results allowed analysis of the spatial variability of sediment yield and to locate sediment source areas in the watershed.

Keywords: Sediment yield. ArcMUSLE. Distributed modeling.

1 INTRODUÇÃO

Os processos erosivos causados pela energia do escoamento superficial podem causar problemas ambientais relacionados a retirada e a posterior deposição do materiais provenientes da superfície do solo. O estudo destes processos possibilita ampliar o conhecimento sobre os fatores que influenciam a sua ocorrência e também localizar as áreas onde ocorrem com maior intensidade, podendo ser utilizados como ferramentas para a gestão de bacias hidrográficas.

Assim, a aplicação de modelos matemáticos para simulação da produção de sedimentos na escala da bacia hidrográfica pode ser considerada uma ferramenta indispensável para o entendimento e quantificação dos processos erosivos. Desta forma, pode-se buscar uma avaliação quantitativa dos processos de produção de sedimento considerando a sua variabilidade espacial na bacia hidrográfica.

Neste sentido, este trabalho tem como objetivo utilizar o modelo ArcMUSLE para simular a produção de sedimento na Bacia do Alto Rio Negro e avaliar os resultados de forma quantitativa e distribuída em relação aos dados observados.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A erosão é um dos principais processos causadores de degradação do solo em ambientes tropicais. Desconsiderando a erosão eólica, todo processo erosivo necessita da presença de água sobre o relevo, considerando o impacto da gota no solo e o escoamento superficial como agentes erosivos principais (BERTONI; LOMBRARDI NETO, 2010). A

produção de sedimento é intimamente relacionada com a precipitação (MORGAN, 2005) e, apesar do impacto da gota da chuva possuir um papel importante na desagregação do solo é o escoamento superficial o responsável pelo transporte e deposição do sedimento.

De maneira geral, o processo erosivo é governando por fatores de ordem hidrológica, geomorfológica e pedológica. Pode-se considerar também a influência humana nas práticas de manejo e conservação dos solos como um dos fatores que influenciam a ocorrência do processo. Assim, Bertoni e Lombardi Neto (2010) afirmam que a erosão é causada por forças ativas, como características da precipitação, declividade, comprimento de rampa e a capacidade de infiltração do solo; e por forças passivas, como a resistência do solo a ação cisalhante da água e a densidade da cobertura vegetal.

A produção de sedimentos é a quantidade de solo erodido que é levada até o exutório da bacia e depende das características da precipitação, fatores físicos dos solos, características topográficas e a cobertura do solo que por sua vez condicionam a produção do material intemperizado, seu transporte e deposição nas vertentes e/ou canais fluviais.

A estimativa de perdas de solo por erosão é uma informação básica, para qualquer tomada de decisão em termos de uso e de manejo das terras, possibilitando a formulação de propostas de ações corretivas (SCHERTZ, 1983). Entretanto, Morgan (2005) afirma que as técnicas experimentais de estimativa da produção de sedimentos não consideram a variabilidade espacial e temporal do processo, dificultando a sua aplicação em larga escala.

Esta dificuldade em quantificar os

processos erosivos para grandes bacias impulsiona o desenvolvimento de modelos de simulação que visem representar matematicamente a produção e transporte de sedimento. Assim, para Chorley e Hagget (1975) um modelo é uma estruturação simplificada da realidade de forma generalizada, que apresenta características ou relações importantes. Para Christofolletti (2002), além de simplificar a realidade o modelo é capaz de reconstruí-la, prever um comportamento ou uma evolução. Assim, os modelos matemáticos são abstrações que pretendem representar o comportamento dos sistemas ambientais utilizando variáveis, parâmetros e constantes matemáticas.

Neste contexto, diversos modelos de simulação dos processos erosivos foram desenvolvidos, sendo os modelos da família USLE (*Universal Soil Loss Equation*) (WISCHEMEIER; SMITH, 1965) os mais difundidos e aplicados internacionalmente. Como evolução da USLE, Williams (1975) propõe uma modificação na equação original do modelo, substituindo o fator erosividade da chuva por um fator referente aos efeitos do escoamento superficial na produção de sedimentos, tornando-o mais adequado para a previsão da produção de sedimentos em bacias hidrográficas.

O modelo proposto por Williams (1975) recebeu o nome de *Modified Universal Soil Loss Equation* (MUSLE) e possui como principal vantagem o caráter preditivo da produção de sedimentos para eventos isolados, tornando suas previsões mais precisas (WILLIAMS; BERNDT, 1977). Assim, para a MUSLE a quantificação do aporte de sedimentos ocorre em função da ação cisalhante do escoamento superficial na desagregação do solo e produção de sedimentos.

A MUSLE é um modelo empírico, determinístico e originalmente concentrado e tem sido freqüentemente utilizado em estudos que visam a quantificação da produção de sedimentos em pequenas e médias bacias hidrográficas, como por exemplo, em Jackson, Gebhardt e Haveren. (1986), Lim et al. (2005), Avanzi et al. (2008) e Zhang et al. (2009).

Além da MUSLE, diversos modelos simulam os processos erosivos na escala da bacia hidrográfica, como por exemplo: AGNPS (*Agricultural Non-Point Source pollution model*), ANSWERS (*Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation*), LISEM (*Limburg Soil Erosion Model*), KINEROS (*A Kinematic Runoff and Erosion Model*), SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) e WEPP (*Water Erosion Prediction Project*).

Os modelos concentrados como a MUSLE continuam sendo amplamente utilizados devido aos poucos dados de entrada necessários e sua simplicidade de operação (LAL, 2001). Desta forma, o modelo se enquadra na realidade brasileira quando considerada a disponibilidade e qualidade de dados cartográficos e hidrológicos, conforme afirmam Chaves (1991) e Avanzi et al. (2008). Outro fator citado para a utilização da MUSLE em condições brasileiras é a disponibilidade de informações referentes aos parâmetros em comum derivados da USLE, modelo amplamente difundido no Brasil (AVANZI et al., 2008).

A integração das equações do modelo MUSLE a um SIG é proposta por Zhang et al. (2009), denominado ArcMUSLE, fazendo com que o modelo assuma um caráter distribuído, podendo ser utilizada para identificação de áreas fontes de sedimento em uma bacia hidrográfica. O ArcMUSLE integra a equação original da MUSLE e o método Curva-Número (CN) (SCS, 1972) ao software ArcGIS 9.3 para quantificar e avaliar a variabilidade espacial da produção de sedimentos na escala da bacia hidrográfica.

O ArcMUSLE é um modelo estático, no qual os processos são considerados independentes do tempo e que permite a simulação dos totais de escoamento superficial e produção de sedimentos para um evento. Apesar de ter sido proposto sem a necessidade de validação da simulação (ZHANG et al., 2009), este procedimento é necessário para verificar a confiabilidade dos resultados.

A comparação entre os dados simulados e observados torna-se ainda mais importante neste caso pelo fato do ArcMUSLE

ser um modelo empírico sem a possibilidade de calibração. Os modelos empíricos, produzidos através de dados experimentais, possuem a limitação de não serem válidos para a representação de sistemas com características diferentes daquelas em que foram realizados os experimentos e frequentemente possuem parâmetros que são calibrados para cada situação (MERRITT; LETCHER; JAKEMAN, 2003).

Para a simulação da altura do escoamento superficial, necessário para o cálculo da geração de escoamento, o ArcMUSLE não realiza a separação do hidrograma. Desta forma, o valor da lâmina de escoamento superficial é obtido por meio da precipitação do evento, considerando a condição antecedente de umidade e a cobertura do solo.

3 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo da variabilidade espacial da produção de sedimentos por meio do ArcMUSLE foi realizado para a bacia do Alto Rio Negro (Figura 1). Esta bacia é definida como a área de drenagem a montante da estação hidrossedimentométrica de Fragosos (Código ANA 65090000), localizada entre os estados do Paraná e de Santa Catarina e entre as latitudes 25°55'73''S e 26°14'17''S; e

longitudes 48°56'34''W e 49°23'12''W, com área de drenagem de 788 km².

De acordo com Zhang et al. (2009), no ArcMUSLE o cálculo do fator Q é realizado com base no método do Curva-Número (CN) (SCS, 1972). O volume de escoamento superficial direto é calculado a partir do volume de precipitação (R) e a retenção potencial de umidade do solo (S), conforme equação (2):

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

A equação (2) é utilizada se $R > 0,2 S$; caso $R \leq 0,2 S$, Q será igual a 0. Desta forma, S corresponde ao parâmetro de retenção (mm H₂O) após o início do escoamento superficial, considerado como sendo uma proporção do volume precipitado no evento. O parâmetro de retenção varia espacialmente de acordo com alterações no uso do solo, características do solo, manejo e declividade e temporalmente, de acordo com alterações na taxa de umidade do perfil do solo.

O cálculo do S é realizado a partir do valor do CN, expresso na relação:

$$S = \frac{1000}{CN - 10} \quad (3)$$

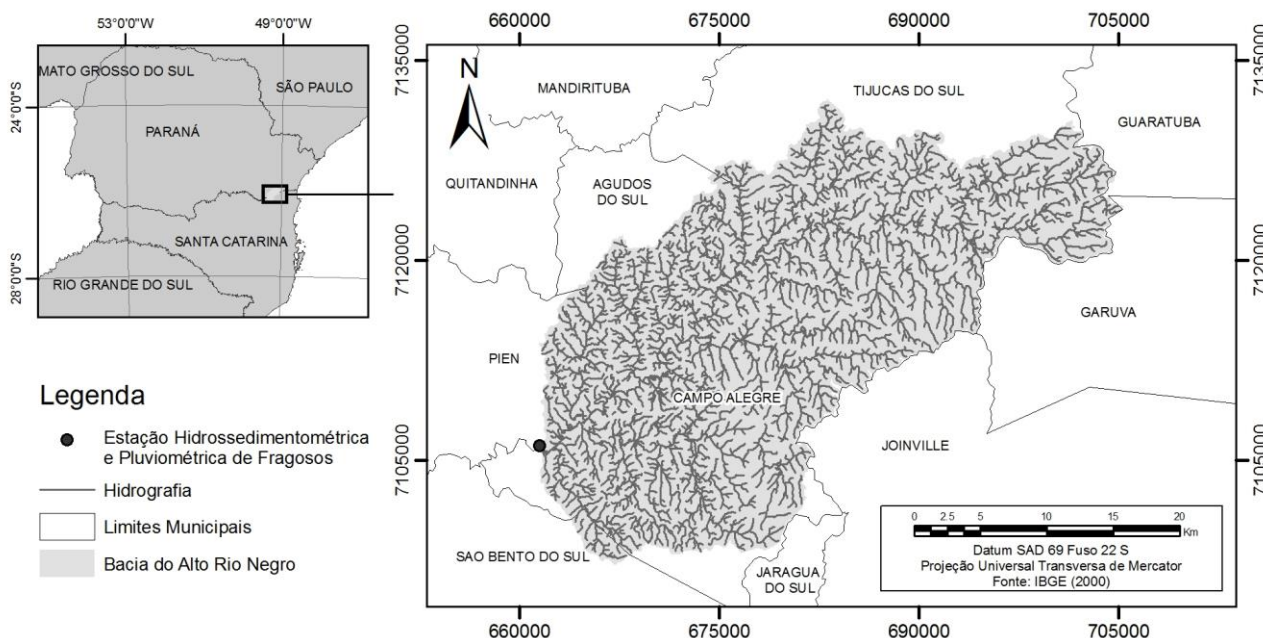


Figura 1: Localização da área de estudo

O valor do CN é obtido a partir do cruzamento dos mapas do grupo hidrológico do solo e uso do solo, com base nos valores indicados em NRCS (1986) e do ajuste do parâmetro AMC (*Antecedent Moisture Condition*) no modelo, correspondente a condição antecedente de umidade no perfil do solo.

De acordo com a equação (2) se o volume precipitado for menor que S , não será gerado escoamento superficial e conseqüentemente, não será produzido sedimento. Entretanto, se o volume precipitado for maior que S , a altura do escoamento superficial (mm) é calculada a partir do total do evento e do valor do CN para cada classe de uso do solo (ZHANG et al., 2009). O ArcMUSLE possibilita a entrada de até 7 classes distintas de uso do solo.

O valor da vazão de pico é calculado pelo método gráfico, com base em NRCS (1986). Assim, os valores de CN, Q e qp são calculados de forma distribuída para cada pixel

da bacia, permitindo a simulação da produção e transferência de sedimentos na bacia hidrográfica considerando a variabilidade espacial do fenômeno.

Para o cálculo do fator LS , o modelo utiliza a equação desenvolvida em Moore e Burch (1986). Os demais parâmetros (K , C e P) foram obtidos a partir da literatura.

A Figura. 2 mostra o fluxograma de atividades para a modelagem da produção de sedimentos utilizando o ArcMUSLE. Para a simulação são necessárias informações que representam as características hidrológicas, pedológicas e topográficas da área de estudo. Os dados de entrada necessários são: Modelo Digital do Terreno (MDT) (Figura 3a), precipitação no evento, precipitação máxima com tempo de retorno de 2 anos, mapa de uso do solo (Figura 3b) (fator C e coeficiente de Manning) e mapa pedológico (fator K e grupo hidrológico do solo - Figuras. 3c e 3d, respectivamente).

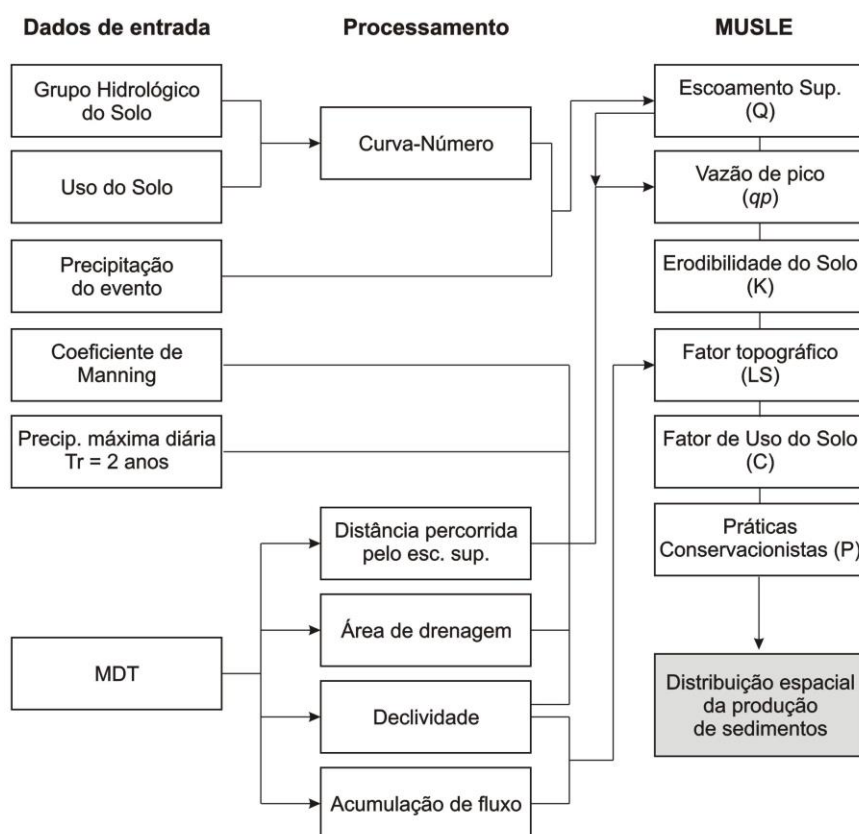


Figura 2: Fluxograma de atividades para a estimativa da produção de sedimentos com o ArcMUSLE

Fonte: Adaptado de Zhang et al. (2009).

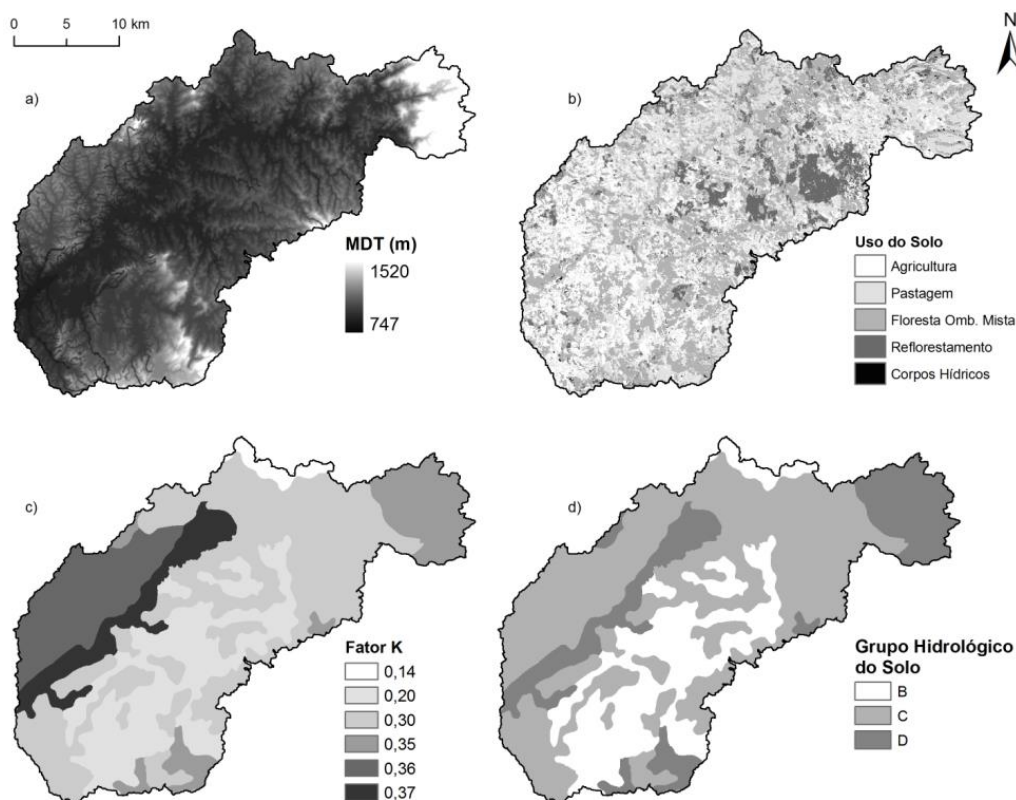


Figura 3: Dados espaciais de entrada do ArcMUSLE: a) Modelo Digital do Terreno; b) Uso do Solo; c) Fator K; d) Grupo Hidrológico do solo

O MDT com resolução espacial de 30m, foi elaborado a partir de cartas topográficas em escala 1:50.000 utilizando o método de interpolação *Topo to Raster* (HUTCHINSON, 1989) disponível na extensão 3D Analyst do software ArcGIS 9.3.

Além do mapa de solos, o modelo requer as informações do grupo hidrológico correspondente e erodibilidade (fator *K*), apresentados na Tabela 1. As classes de solos são provenientes de Bhering e Santos (2008) e Embrapa (2004), e a classificação destes em grupos hidrológicos seguiu o método recomendado por Sartori (2004). O fator *K* foi definido conforme os valores adotados em Santos, Krüger e Levis (1998).

Tabela 1: Atributos dos solos

Classe de solo	Área (%)	Grupo Hidrológico	Fator K
Argissolo	13	C	0,36
Cambissolo	44	C	0,30
Gleissolo	8	D	0,37
Latossolo	2	B	0,14
Neossolo	11	D	0,35
Nitossolo	22	B	0,20

O uso do solo (Figura 3b) foi produzido utilizando classificação automática de imagens do satélite LandSat, sensor TM-5, com órbitas/ponto 220/79, 220/78 e 221/78, de julho de 2007 com resolução espacial de 30m. Os valores do fator *C* e do coeficiente de rugosidade, foram atribuídos para cada classe, segundo Neitsch et al. (2005) (Tabela 2). As práticas conservacionistas foram desconsideradas, sendo atribuído valor 1 ao fator *P*.

Tabela 2: Atributos de uso do solo

Uso do Solo	Área (%)	Fator C	Manning
Agricultura	24	0,2	0,07
Corpos Hídricos	1	0	0,01
Floresta	38	0,001	0,10
Pastagem	28	0,003	0,10
Reflorestamento	9	0,001	0,14

A chuva com duração de 24 h e tempo de retorno de 2 anos foi determinada utilizando a equação de chuvas intensas de Curitiba (FENDRICH, 1998), por esta ter sido produzida com longo período de dados observados (30 anos) e por não haver outra

estação pluviométrica próxima da área de estudo que possua este tipo de estudo.

Para os dados de entrada de precipitação optou-se pela escolha de um evento em que fosse gerado apenas um pico de vazão. Desta forma, foi selecionado o maior evento de precipitação com duração de 24 horas, conforme resolução temporal do modelo, considerando ainda que não houvesse volume acumulado de precipitação maior que 10mm nos sete dias anteriores e posteriores ao evento selecionado.

O baixo valor de precipitação acumulada anterior ao evento permite caracterizar a condição antecedente de umidade como tipo I, na qual solo apresenta-se seco, porém não em estado de ponto de murcha permanente (McCUEN, 1989).

Utilizando a série diária de precipitação de 35 anos da estação pluviométrica de Fragosos (02649018), o maior evento que atendeu a estas condições foi de 60mm (Figura. 4).

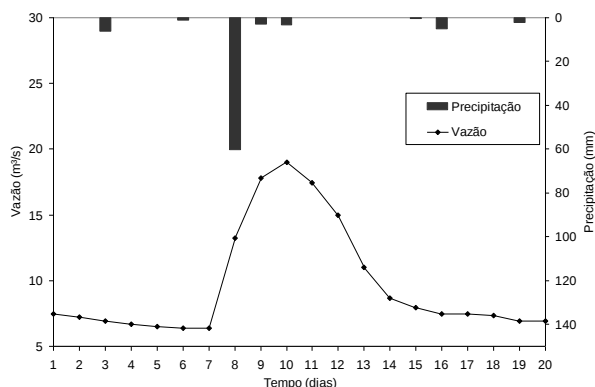


Figura 4: Hidrograma e hietograma do evento selecionado.

O escoamento superficial gerado no evento de precipitação foi determinado pela separação do hidrograma utilizando o método gráfico e identificando a tendência do escoamento de base por inspeção visual (TUCCI, 1993). Para avaliação dos resultados simulados realizou-se a comparação com dados de vazão e transporte de sedimento da estação hidrossedimentométrica de Fragosos (Figuras. 4 e 5).

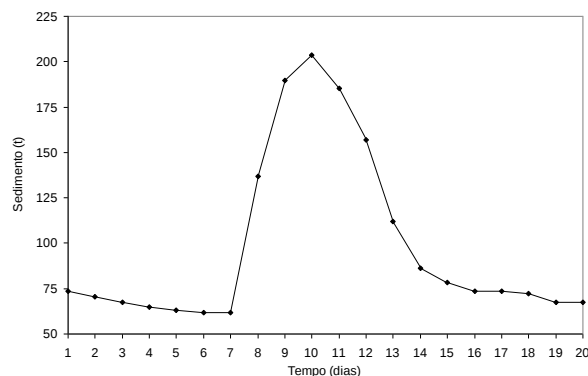


Figura 5: Sedimentograma do evento selecionado

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O escoamento superficial e o total da produção de sedimentos simulados com o ArcMUSLE foram comparados com os dados mensurados referente ao evento considerado (Tabela 3). O escoamento superficial simulado apresentou resultado 8,81% superior ao valor do escoamento obtido pela separação do hidrograma do evento. A tendência do método Curva-Número de superestimar o escoamento foi observada em estudos para a mesma bacia hidrográfica, nos quais foram reduzidos os valores iniciais de CN a fim de ajustar a calibração do modelo SWAT em relação aos dados observados (SOUZA, 2011; SCHULTZ et al., 2011).

Tabela 3: Comparativo dos dados observados e simulados.

	Obs.	Sim.	Dif.
Escoamento superficial (mm)	5,69	6,23	8,81%
Produção de sedimentos (t)	1.211,21	1.730,7	30,02%

A produção de sedimentos simulada apresentou consequentemente resultados também superiores em aproximadamente 30% em relação ao observado nas medições acumuladas para o evento. A maior diferença no resultado de produção de sedimento se deve as simplificações na simulação dos processos de transporte de sedimentos, que não considerara a dinâmica de deposição e degradação do canal fluvial.

Apesar de superestimados, os resultados do evento simulado podem ser

considerados satisfatórios levando-se em consideração que o modelo não admite calibração e também a grande complexidade dos processos relacionados à produção de sedimentos. No entanto, este desempenho do modelo pode estar associado às características do hidrograma do evento escolhido, podendo não ser reproduzida em hidrogramas mais complexos.

No entanto, a espacialização do fenômeno e do processo erosivo é válida e possibilita a análise da distribuição dos resultados e suas relações. Como resultados da aplicação do ArcMUSLE obteve-se a distribuição espacial do fator *LS* (Figura 6a), *CN* (Figura 6b), altura da lâmina de escoamento superficial (Figura 6c) e a produção de sedimentos na bacia hidrográfica para o evento simulado (Figura 6d).

A distribuição espacial dos maiores valores do fator *LS* coincide com as áreas de maiores declividades e encostas da bacia, localizadas a nordeste e notadamente na porção relativa a Serra do Mar. Os menores valores ocorrem na planície do rio Negro, devido à menor declividade.

Os valores de *CN* variaram de 35 a 76, sendo conferido *CN*=0 aos corpos hídricos. Os maiores valores de *CN* foram atribuídos a associação entre pastagem ou agricultura e solos do grupo D (Gleissolo e Neossolo), sendo estas áreas responsáveis pelos maiores valores de escoamento superficial gerado na bacia (15,5mm). Estas áreas apresentam um maior potencial de transporte de sedimentos pelo escoamento superficial e consequentemente, de empobrecimento do solo pela perda de nutrientes via processos erosivos. Além disso, a partir da análise do mapa de *CN* é possível identificar as possíveis áreas de recarga do aquífero raso, provenientes da associação de solos do tipo B, com maior capacidade de infiltração e usos do solo como floresta e reflorestamento, gerando os menores valores de *CN* para a bacia hidrográfica.

Nota-se a relação direta entre a distribuição espacial do *CN* e do escoamento superficial, uma vez que quanto maior for o valor do *CN*, maior será o escoamento superficial (CHAVES, 1991). Desta forma, o mapa da distribuição espacial do escoamento superficial pode ser útil durante um processo

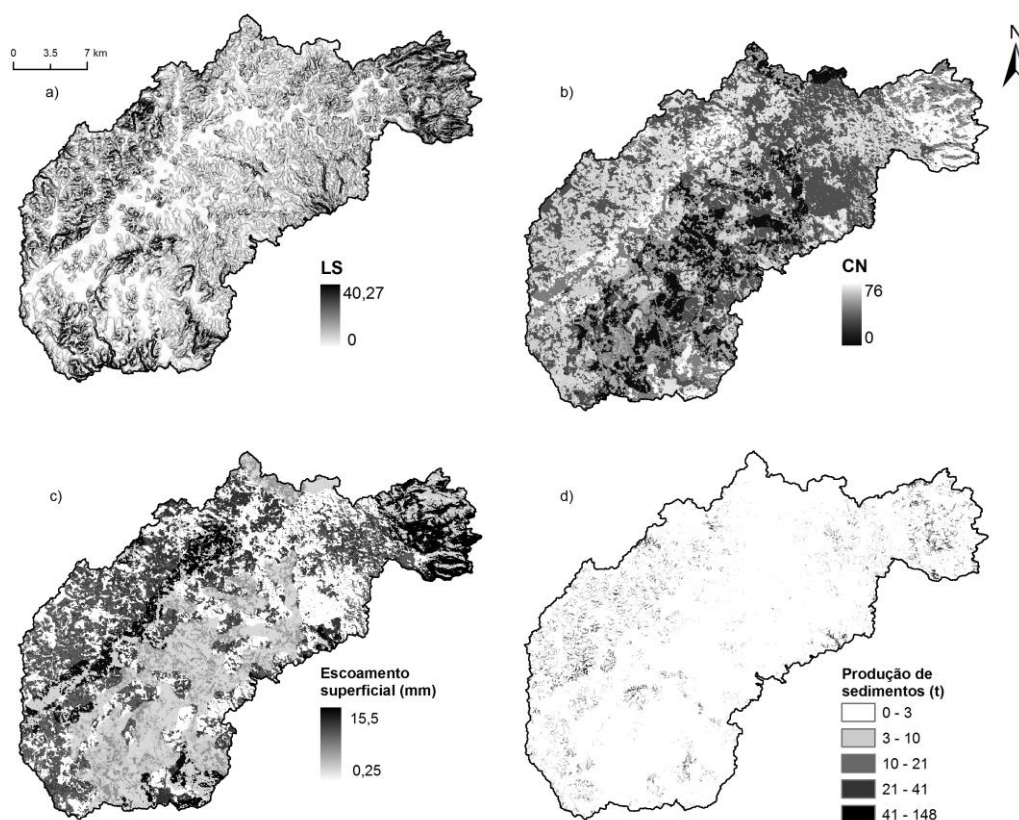


Figura 6: Resultados do ArcMUSLE: a) *LS*; b) *CN*; c) Escoamento Superficial (mm); d) Produção de sedimentos (t)

de manejo do solo, uma vez que podem ser identificadas áreas onde as práticas de manejo e conservação devem ser revistas para diminuir a geração de escoamento superficial (p.ex.: construção de terraços visando diminuir o comprimento de rampa e diminuição do potencial de geração de escoamento em uma parcela).

Pode-se também estabelecer a relação entre as áreas fontes de escoamento e as áreas com maior produção de sedimentos na bacia, uma vez que estes processos possuem relação direta. A análise da distribuição espacial da produção de sedimentos indica que as áreas de maior produção são também as de maior escoamento superficial, evidenciando a importância da condição hidrológica, resultante da interação entre topografia, solos e cobertura do solo, como condicionante do processo erosivo. A grande variação da produção de sedimentos entre as áreas fonte indica que as produções totais da bacia provêm de pequenas áreas com grande potencial de produção.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho buscou-se a aplicação da MUSLE integrada a um ambiente SIG para a quantificação da produção de sedimentos de forma espacialmente distribuída para a bacia do Alto Rio Negro, de forma a avaliar o modelo ArcMUSLE.

Embora seja de simples parametrização e sem a possibilidade de calibração, o ArcMUSLE mostrou bom desempenho na simulação de um evento específico, para a estimativa do escoamento superficial e produção de sedimentos da bacia hidrográfica. Destacam-se como principais limitações do modelo o número limitado de usos do solo disponíveis para os dados de entrada e a impossibilidade de alteração dos valores do CN, ou seja, não possibilitando a calibração do modelo pela interface SIG.

Além disso, o fato de estar limitado a simulação de valores totais de eventos isolados torna o modelo ArcMUSLE pouco atraente para aplicações práticas, comparativamente

com modelos similares mais robustos e de simulação contínua, como por exemplo o SWAT. Salienta-se ainda a incerteza associada ao parâmetro relativo à condição antecedente de umidade no solo (AMC), uma vez o modelo não possui memória e não é possível a inserção do hidrograma com dados de precipitação anterior ao evento simulado.

Considera-se também que o ArcMUSLE foi avaliado a partir da sua aplicação em um evento ideal, onde a precipitação gerou apenas um pico no hidrograma. Desta forma, recomenda-se a sua avaliação para representação da geração de escoamento superficial e produção de sedimentos em eventos complexos.

Apesar de superestimados em 8,81% e 30,02% para geração de escoamento superficial e produção de sedimentos respectivamente, os resultados foram considerados satisfatórios e evidenciou-se a necessidade de validação das simulações matemáticas com dados observados. Desta forma, a modelagem matemática de sistemas ambientais só é válida quando se torna possível aumentar as informações a partir de dados medidos. Assim, modelos são complementares e não devem ser usados em substituição aos dados medidos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem aos membros do Laboratório de Hidrogeomorfologia da UFPR pelas discussões, comentários e críticas a este trabalho e ao Programa REUNI pela concessão das bolsas de pesquisa.

REFERÊNCIAS

- AVANZI, J. C. et al. Calibração e aplicação do modelo MUSLE em uma microbacia hidrográfica nos Tabuleiros Costeiros brasileiros. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 12, n. 6, p. 563-569, 2008.
- BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 7. ed. São Paulo: Ícone, 2010.

- BHERING, S. B.; SANTOS, H. G. **Mapa de solos do estado do Paraná**. Rio de Janeiro: Embrapa Florestas, 2008.
- CHAVES, H. M. L. Análise global de sensibilidade dos parâmetros da Equação Universal de Perda de Solo Modificada (MUSLE). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.15, n. 3, p. 345-350, 1991.
- CHORLEY, R. J.; HAGGET, P. **Modelos físicos e de informação em Geografia**. São Paulo: Livros Técnicos e Científicos, 1975.
- CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de sistemas ambientais**. São Paulo: E. Blücher, 2002.
- EMBRAPA. **Solos do Estado de Santa Catarina**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2004. (Boletim de pesquisa e desenvolvimento, n. 46).
- FENDRICH, R. **Chuvas intensas para obras de drenagem no Estado do Paraná**. Curitiba: Champanhath, 1998.
- HUTCHINSON, M. F. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 106, no. 3-4, p. 211-232, 1989.
- JACKSON, W. L.; GEBHARDT, K.; VAN HAVEREN, B. P. Use of the modified universal soil loss equation for average annual sediment yield estimates on small rangeland drainage basins. In.: HADLEY, R. F. (Ed.). **Drainage basin sediment delivery**. Albuquerque: IAHS 1986. p. 413-422.
- LAL, R. Soil degradation by erosion. **Land Degradation & Development**, Chichester, v. 12., no. 6, p. 519-539, 2001.
- LIM, K. J. et al. GIS-based sediment assessment tool. **Catena**, Amsterdam, v. 64, no. 1, p. 61-80, 2005.
- McCUEN, R. H. **Hydrologic analysis and design**. New Jersey: Prentice Hall, 1989.
- MERRITT, W. S.; LETCHER, R. A.; JAKEMAN, A. J. A review of erosion and sediment transport models **Environmental Modeling & Software**, Oxford, v. 18, no. 8-9, p. 761-799, 2003.
- MOORE, I.; BURCH, G. Physical basis of the length-slope factor in the Universal Soil Loss Equation. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 50, no. 5, p. 1294-1298, 1986.
- MORGAN, R. P. C. **Soil erosion and conservation**. 3. ed. Padstow: Blackwell Publishing, 2005.
- NEITSCH, S. L. et al. **Soil and water assessment tool: theoretical documentation: versão 2005**. 2005. Disponível em: <<http://swatmodel.tamu.edu/media/1292/SWAT2005theory.pdf>>. Acesso em: 25 abr. 2011
- NRCS. **Urban hydrology for small watersheds**. Washington, D.C.: US Department of Agriculture, 1986. (Technical Release 55, 210-VI-TR-55, 728).
- SARTORI, A. **Avaliação da classificação hidrológica do solo para a determinação do excesso de chuva do método do serviço de conservação do solo dos Estados Unidos**. 2004. 161 f. Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2004.
- SANTOS, I.; KRÜGER, C. M.; LEVIS, M. **Projeto HG-118: estudos hidrometeorológicos para os estudos de inventário da bacia hidrográfica do rio Ivaí**. CURITIBA: CEHPAR/UFPR/COPEL, 1998. (Relatório técnico, n. 1 – Avaliação de perdas de solo).
- SCHERTZ, D. L. The basis for soil loss tolerance. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v. 38, no. 1, p. 10-14, 1983.
- SCHULTZ, G. B. ; SOUZA, R. M. ; SANTOS, I. Simulação da produção e transporte de sedimentos com o modelo SWAT: aplicação na bacia do Altíssimo Rio Negro. In: LIMA, J. E. F. W.; LOPES, W. T. A. (Org.). **Engenharia de sedimentos: na busca de soluções para problemas de erosão e assoreamento**. Brasília, DF: ABRH, 2011. p. 365-382.

SCS. Section 4: hydrology. In: USDA-SCS. **National engineering handbook.** Washington, D.C., 1972.

SOUZA, R. M. **Regionalização de vazões mínimas na bacia hidrográfica do altíssimo Rio Negro, região Sul-Brasileira, com a aplicação do modelo SWAT.** 2011. 124 f. Dissertação (Mestrado)-Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-Graduação em Geografia, 2011.

TUCCI, C. E. M. Escoamento superficial. In: _____ (Org.). **Hidrologia: ciência e aplicação.** Porto Alegre: Edusp, 1993. p. 373-441.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. **Predicting rainfall erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains:** Guide for selection of practices for soil and water conservation. Washington, D.C.: USDA, 1965.

WILLIAMS, J. R. Sediment-yield prediction with Universal Equation using runoff energy factor. In: PRESENT and prospective technology for predicting sediment yield and sources. Oxford: USDA, 1975. p. 244-252.

WILLIAMS, J. R.; BERNDT, H. D. Determining the universal soil loss equation's length-slope factor for watershed. In: SOIL erosion: prediction and control. Ankeny: Soil Conservation Society of America, 1977. p. 217-225.

ZHANG, Y. et al. Integration of Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE) into a GIS framework to assess soil erosion risk. **Land Degradation & Development,** Chichester, v. 20, no. 1, p. 84-91, 2009.

Data de submissão: 09.05.2011

Data de aceite: 20.07.2012

License information: This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited