

CALIBRAÇÃO E VALIDAÇÃO DA EQUAÇÃO UNIVERSAL DE PERDA DE SOLOS MODIFICADA (MUSLE) UTILIZANDO DADOS HIDROSEDIMENTOLÓGICOS LOCAIS⁽¹⁾

Celina Rubiano da Silva⁽²⁾, Henrique Marinho Leite Chaves⁽³⁾ & Ana Paula Camelo⁽⁴⁾

RESUMO

Modelos hidrossedimentológicos são úteis na análise ambiental de bacias hidrográficas não monitoradas. Entretanto, para que as suas predições sejam confiáveis, é necessário que os modelos sejam adequadamente calibrados e validados para as condições locais. O objetivo do presente trabalho foi calibrar o coeficiente a da MUSLE para as condições da bacia do ribeirão Pipiripau, usando dados hidrossedimentológicos locais, bem como validar a equação calibrada, com uma série de dados diferente da usada na calibração. O coeficiente a da MUSLE foi calibrado por meio do ajuste entre os valores observados e calculados de aporte de sedimento de eventos individuais, correspondentes ao período entre 1999 e 2005, usando dados hidrológicos (Q e q_p) observados. Para validação do modelo calibrado, a série usada correspondeu aos anos de 1998 e 2006-2009 (N.A.: dados corretos, ver p. 12), onde apenas os dados pluviométricos locais e os fatores CN, K, L, S, C e P da bacia, previamente obtidos, foram usados. Os resultados indicam que a MUSLE calibrada apresenta melhor acurácia na estimativa do aporte de sedimento total anual ($R^2 = 0,68$ e $E = 0,61$) do que em nível mensal ($R^2 = 0,44$ e $E = 0,43$). Como o coeficiente de ajuste a da MUSLE foi proporcional ao volume de precipitação pluvial anual, este poderá ser usado para melhorar as predições do modelo.

Termos de indexação: calibração, validação, modelos, MUSLE, aporte de sedimento.

⁽¹⁾ Recebido para publicação em 16 de dezembro de 2010 e aprovado em 30 de maio de 2011.

⁽²⁾ Eng. Florestal, Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB. E-mail: celina.rubiano@gmail.com

⁽³⁾ Professor do Depto. de Engenharia Florestal, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília – UnB. CEP 70910-900 Brasília (DF). E-mail: hchaves@unb.br

⁽⁴⁾ Eng. Florestal, mestranda do Depto. de Eng. Florestal, Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília-UnB. E-mail: paulaflorestal@gmail.com

SUMMARY: CALIBRATION AND VALIDATION OF THE MODIFIED UNIVERSAL SOIL LOSS EQUATION (MUSLE) WITH LOCAL HYDROLOGIC AND SEDIMENTOLOGIC DATA

Hydro-sedimentologic models are useful in the environmental analysis of unmonitored watersheds. However, the models must be calibrated and validated for accurate predictions. The objective of this study was to calibrate MUSLE for the conditions of the Piripipau river basin (Brazil), using hydrologic and sedimentologic data from 1999 to 2005, and to validate the calibrated model with another data set (1998, 2006-2009). MUSLE's a coefficient was calibrated fitting observed and calculated sediment yield values of individual events, using observed hydrologic data (Q and q_p). In the validation stage of the calibrated model, only observed rain gauge data and previously obtained CN, K, L, S, C, and P values of the watershed were used. Results indicate that the calibrated MUSLE fit better to total annual sediment yields ($R^2 = 0.68$ and $E = 0.61$) than monthly Y values ($R^2 = 0.44$ and $E = 0.43$). Since coefficient a was directly related to the annual precipitation volume, it can be used to improve MUSLE predictions.

Index terms: calibration, validation, model, MUSLE, sediment yield.

INTRODUÇÃO

Modelos hidrossedimentológicos utilizados na gestão ambiental de bacias hidrográficas estão em constante aperfeiçoamento, buscando maior facilidade de aplicação e melhor acurácia. Modelos estimadores de erosão e sedimentação, como a MUSLE (Williams, 1975) e suas modificações, têm sido muito utilizados na predição do aporte de sedimento em pequenas bacias hidrográficas não monitoradas (Sadeghi et al., 2007; Chaves, 2010), inclusive na estimativa do serviço ambiental relativo à redução da sedimentação (Chaves et al., 2004). Entretanto, como os modelos frequentemente são desenvolvidos em condições climáticas e hidrológicas distintas daquelas onde eles são aplicados, sua utilização nos trópicos requer cautela (Chaves, 1996).

A MUSLE é uma modificação da Equação Universal de Perda de Solos (USLE) que, ao contrário da última, desenvolvida para a estimativa da erosão média em vertentes (Wischmeier & Smith, 1978), é usada na estimativa do aporte de sedimento em bacias (Williams, 1975). A MUSLE é um modelo empírico, que requer a estimativa adequada de suas variáveis, bem como a calibração de seus parâmetros para as condições locais (Chaves, 1991; Sadeghi et al., 2007). Na MUSLE, o aporte de sedimento no exutório de uma determinada bacia em um dado evento é dado pela seguinte equação (Williams, 1975):

$$Y = a (Q q_p)^b KLS C P \quad (1)$$

em que Y é o aporte de sedimento em um determinado evento (t); a e b são coeficientes de ajuste (adimensionais); Q é o volume de escoamento superficial do evento (m^3); q_p é a vazão de pico do evento ($m^3 s^{-1}$); K é a erodibilidade média dos solos da bacia

($t h MJ^{-1} mm^{-1}$); C é o fator médio de uso e manejo do solo da bacia (adimensional); LS é fator de comprimento de rampa e declividade das vertentes da bacia (adimensional); e P é o fator de práticas conservacionistas (adimensional). A estrutura da MUSLE (Equação 1) é largamente utilizada em outros modelos hidrossedimentológicos da literatura, como o SWAT (Srinivasan & Arnold, 1994). Independentemente do modelo, suas predições são aceitáveis somente após detalhados processos de calibração e validação, o que nem sempre é feito na prática.

Na MUSLE original, os coeficientes da equação 1 no Sistema Internacional são $a = 11,8$ e $b = 0,56$ (Williams, 1975). Os fatores K, LS, C e P, por sua vez, são obtidos de tabelas e de dados topográficos da bacia de interesse, e Q e q_p são estimados por meio de modelos chuva-vazão, em que as variáveis são o volume de precipitação pluvial do evento (P), o número-curva médio da bacia (CN) e a área da bacia (A), dados pelas seguintes equações (Chow et al., 1988):

$$Q = (P - 0,2 S)^2 / (P + 0,8 S) \text{ se } (P - 0,2 S \geq 0) \quad (2)$$

em que: S (mm) = $25.400/CN - 254$, P = precipitação pluvial no evento e CN = número-curva médio da bacia (adimensional), obtido de tabelas apropriadas, ou de calibração por meio da equação 2. A vazão de pico, q_p , pode ser calculada pela seguinte equação (Schwab et al., 1981):

$$q_p = 0,0021 Q A / T_p \quad (3)$$

em que: q_p ($m^3 s^{-1}$) é a vazão de pico do evento; Q (mm) é o volume de escoamento superficial; A (ha) é a área da bacia; e T_p (h) é o tempo de pico do hidrograma.

Em uma análise de sensibilidade com a MUSLE, Chaves (1991) concluiu que o modelo foi mais sensível

às variáveis P e CN (Equação 2) do que aos outros fatores da equação 1, mostrando a importância das variáveis hidrológicas no processo sedimentológico.

Além disso, os coeficientes a e b da MUSLE podem variar em função das condições fisiográficas e hidrológicas das bacias, uma vez que a relação de aporte de sedimento, que é a razão entre o aporte de sedimento e a erosão total na bacia, é muito variável (Sadeghi et al., 2007; Chaves, 2010). Assim, se estiverem inadequados para as condições locais, os coeficientes a e b da equação 1 podem levar à super ou subestimativa do aporte de sedimento Y , reduzindo a acurácia das previsões da MUSLE.

Apesar de estudos com a MUSLE e com modelos dela derivados indicarem bom ajuste entre os valores de aporte de sedimento calculados pelo modelo e os observados (Arekhi, 2008; Shen et al., 2009), há alguns casos em que os coeficientes de ajuste do modelo tiveram de ser modificados para melhor explicar o comportamento sedimentológico das bacias estudadas. Avanzi et al. (2008) obtiveram valores de 14,96 e 0,59 para os coeficientes a e b da MUSLE, respectivamente, para uma pequena bacia nos tabuleiros costeiros do Espírito Santo.

Considerando o exposto, o objetivo do presente trabalho foi calibrar o coeficiente a da MUSLE usando séries de dados hidrossedimentológicos da bacia do ribeirão Pipiripau, bem como validar o modelo calibrado, usando uma série histórica de dados distinta da usada na calibração.

MATERIAL E MÉTODOS

Caracterização da área de estudo

A bacia do ribeirão Pipiripau (Figura 1), localizada na região nordeste do Distrito Federal (coordenadas $15^{\circ} 27' 14''$ S e $47^{\circ} 27' 47''$ W), tem uma área total de 235 km^2 e declividade média de 5,5 %. Os solos dominantes na bacia são os Latossolos e os Cambissolos (Chaves & Piau, 2008); cerca de 70 % da superfície total da bacia é usada com atividades agrícolas e pecuárias, com 30 % cobertos por cerrado natural (CAESB, 2001).

A ausência de proteção adequada do solo, somada aos solos erodíveis e à alta erosividade da chuva, é a principal causa da erosão hídrica na bacia do ribeirão Pipiripau (Chaves & Piau, 2008). Como 30 % das áreas de proteção permanente estão degradadas (Brasil, 2010), em muitos trechos elas não são suficientes para reter o aporte de sedimento, resultando no assoreamento dos cursos d'água da bacia.

Dados hidrossedimentológicos

Os dados diários de precipitação pluvial e vazão utilizados no presente trabalho foram obtidos no portal HIDROWEB/ANA (Brasil, 2010), a partir de estações

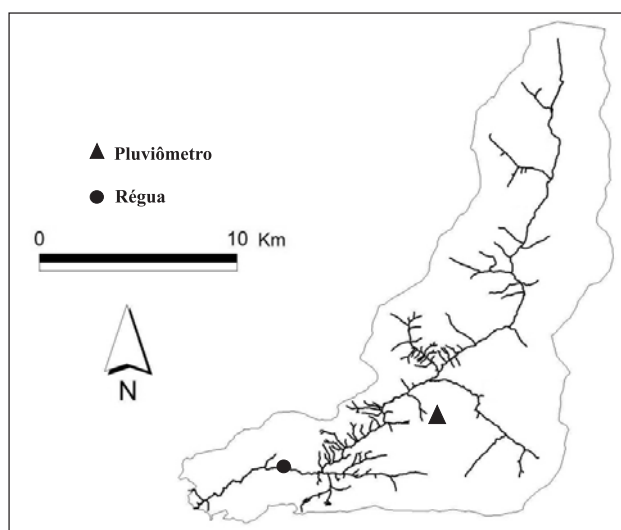


Figura 1. Layout da bacia hidrográfica do ribeirão Pipiripau, mostrando as localizações do pluviômetro e da régua limimétrica.

pluviométricas e fluviométricas, respectivamente. Os dados pluviométricos são da estação Taquara (código ANA No. 1547013), localizada próximo ao centroide da bacia, e os dados de vazão foram obtidos da estação Frinocap (código ANA No. 60473000), situada próximo do exutório da bacia (Figura 1). Neste trabalho foram utilizadas as séries históricas de vazão e precipitação pluvial entre os anos de 1995 e 2009 (não contínuos).

Além disso, foram utilizados dados de sólidos suspensos totais-SST (mg L^{-1}), obtidos na bacia pela Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal-CAESB, para o cálculo do aporte de sedimento, usado na calibração e validação da MUSLE. A série disponível de SST diária foi a do período entre 2002 e 2009 (CAESB, 2010).

Obtenção do escoamento direto dos hidrogramas

A partir dos dados diários de vazão, foram gerados hidrogramas anuais para o ribeirão Pipiripau. Além disso, para a calibração e validação da MUSLE, foi necessária a decomposição dos hidrogramas totais em escoamentos de base e escoamento direto.

Assim, os hidrogramas totais observados na estação Frinocap foram decompostos por meio de um filtro digital desenvolvido por Arnold & Allen (1999). A partir desse filtro, foi possível estimar o escoamento de base e, por subtração deste último do escoamento total, obteve-se o escoamento direto. O filtro digital usado na estimativa da vazão de base em cada evento foi:

$$q_t = \beta q_{t-1} + \frac{1+\beta}{2} (q'_t - q'_{t-1}) \quad (4)$$

em que q_t ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$) é a vazão filtrada, ou seja, a vazão de base no tempo t (em dias); β é o parâmetro do filtro (adimensional), tomado como 0,925 (Arnold & Allen, 1999); e q' ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$) é a vazão total observada no tempo t .

Obtenção da vazão sólida e do aporte de sedimento observados na bacia

A partir dos dados de concentração de sólidos (SST) e de vazão líquida observada, foram obtidas as vazões sólidas (q_s) para as datas em que houve aporte significativo de sedimento ao exutório da bacia, por meio do seguinte produto:

$$q_s = q \text{ SST} \quad (5)$$

em que: q_s (g s^{-1}) = vazão sólida no exutório da bacia; q ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) = vazão líquida observada no exutório; e SST (mg L^{-1}) = concentração observada de sólidos totais suspensos.

Deve-se ressaltar que a utilização de apenas dados de sólidos totais suspensos pode, em alguns casos, subestimar a vazão sólida total, uma vez que a descarga de fundo é desconsiderada (Yang, 1996). Entretanto, tendo em conta que esta última representa apenas 5–10 % da primeira (Carvalho et al., 2000), a descarga de fundo foi considerada desprezível em relação à descarga sólida total. Com o intuito de reduzir os erros sistemáticos de observação, os valores de SSP selecionados foram aqueles superiores a $2,0 \text{ mg L}^{-1}$, sendo os valores inferiores a esse limite considerados desprezíveis.

Uma vez obtida a vazão sólida (Equação 5), obteve-se, por regressão linear simples, uma relação empírica entre a vazão sólida e a vazão líquida no período entre 2000 e 2005, que foi usada para calcular o aporte de sedimento observado (Y_o) nos períodos de calibração e validação. Esse, por sua vez, é igual à integral do sedimentograma do evento, ou seja:

$$Y_o = \int_0^t q_s \, dt \quad (6)$$

em que Y_o (t) = aporte de sedimento observado; q_s (g s^{-1}) = vazão sólida observada; e t (s) = tempo.

Calibração do Coeficiente α da MUSLE

Uma vez que os fatores K, C, LS e P da equação (1) já haviam sido obtidos para a bacia do Pipiripau por Chaves & Piau (2008), a partir de dados pedológicos, de uso e manejo do solo e topográficos, respectivamente, eles foram reutilizados no presente trabalho. Os valores médios dos fatores foram $K=0,0177 \text{ t ha h ha}^{-1}$, $C=0,114$, $LS=2,142$ e $P=0,76$ (Chaves & Piau, 2008).

As variáveis hidrológicas Q (m^3) e q_p ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$), por sua vez, foram obtidas dos dados diários de vazão da estação Frinocap para o período de calibração (1999-2005), sendo a primeira obtida por meio do filtro digital (Equação 4), após integração em relação ao tempo, e a segunda diretamente, a partir dos hidrogramas individuais.

A partir dos dados observados de aporte de sedimento anual na bacia, no período entre 2000 e 2005, dos dados calculados pela MUSLE em sua forma

original (Williams, 1975) e dos valores médios dos fatores K, LS, C e P, obtidos anteriormente para a bacia por Chaves & Piau (2008), além dos valores de Q e q_p dos eventos significativos da série hidrológica, o coeficiente α da equação 1 foi calibrado da seguinte forma: (a) para cada evento erosivo significativo, dividiu-se o valor de aporte de sedimento observado (Y_o) pelo resultado da equação 1, sem o coeficiente α . Esse resultado foi denominado α' ; (b) obteve-se a média do valor de α' de todos os eventos do ano (denominado α_{mod}) e, finalmente, a média dos sete anos do período de calibração (1999-2005). Essa média global foi denominada de coeficiente α modificado médio ($\alpha_{mod. \text{ méd}}$); (c) este último foi usado na equação 1 em substituição ao valor de α original da MUSLE (11,8) para o cálculo de Y em cada evento do período de validação (1998, 2006-2009).

A seleção dos eventos usados na calibração (significativos) foi feita usando-se três critérios simultâneos: ocorrência de escoamento direto por mais de um dia; ocorrência de picos de vazão claramente identificados no hidrograma; e ocorrência de chuva na data do pico do hidrograma ou nos três dias imediatamente anteriores.

Validação da MUSLE

O período usado para validação do modelo, diferente daquele usado na calibração (James & Burges, 1982), correspondeu aos anos de 1998, 2006, 2007, 2008 e 2009. A validação foi feita pela comparação entre o aporte de sedimento calculado pela MUSLE (Y_c), ajustada pelo coeficiente α_{mod} , e o aporte de sedimento observado no período (Y_o). Valores acumulados mensais e anuais de Y foram usados.

Na validação, os valores dos fatores K, LS, C e P foram os mesmos obtidos por Chaves & Piau (2008) para a bacia do ribeirão Pipiripau. No caso das variáveis hidrológicas, o volume de escoamento direto no evento (Q) foi calculado pela equação 2, onde os valores da precipitação pluvial diária (pontual) do pluviômetro foram abatidos para a área da bacia, por meio da seguinte equação (Taborga-Torrico, 1974):

$$P_a = P [1 - 0,1 \log (A / 25)] \quad (7)$$

em que: P_a (mm) = precipitação pluvial diária abatida para a bacia; P (mm) = precipitação pluvial diária observada no posto; e A = área da bacia (km^2).

O número-curva da bacia (CN) foi obtido através de calibração por meio da rotina de “atingimento de meta” do MS-Excel, usando a equação 2, e de valores de P (abatido para a área da bacia) e Q observados no período entre 1991 e 2009. Não se corrigiu o CN para condições de umidade antecedente no estudo de validação, pois Chaves & Piau (2008) haviam reportado que essa correção resultaria em piora no ajuste do modelo chuva-vazão na bacia.

No caso da vazão de pico (q_p), como não havia informação segura sobre a duração das chuvas na

bacia, dificultando, portanto, a estimativa do tempo de pico do hidrograma triangular sintético (Equação 3), obteve-se q_p por meio de uma relação empírica entre os valores de Q e q_p , observados no período de calibração (1999-2005).

A validação da MUSLE foi feita usando-se três indicadores de acurácia: (a) o gráfico de dispersão entre os valores de aporte de sedimento mensais e anuais observados (Y_o) e calculados (Y_c) no período de validação; (b) o coeficiente de determinação (R^2) entre os valores mensais e anuais de (Y_o) e (Y_c) no período de validação; (c) o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (1970) entre os valores mensais e anuais de (Y_o) e (Y_c) no período de validação. Este último é mais restritivo que o coeficiente de determinação (Krause et al., 2005), sendo dado pela seguinte equação:

$$E = 1 - \frac{\sum_{t=1}^T (Y_o - Y_c)^2}{\sum_{t=1}^T (Y_o - \bar{Y}_o)^2} \quad (8)$$

em que $Y_o(t)$ é o aporte de sedimento anual observado; $Y_c(t)$ é o aporte de sedimento anual calculado pelo modelo corrigido; $\bar{Y}_o(t)$ é o aporte de sedimento médio, observado nos meses ou anos analisados; e T é o número total de meses ou anos analisados. O coeficiente E varia de $-\infty$ a 1, e o ajuste será melhor à medida que se aproxima de 1,0 (Nash & Sutcliffe, 1970), sendo considerado satisfatório quando $E > 0,5$ (Moriassi et al., 2007).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Vazão sólida e aporte de sedimento

A regressão entre as vazões líquida e sólida, obtida a partir dos dados hidrossedimentológicos, disponíveis apenas no período entre 2002 e 2009, foi a seguinte:

$$q_{sol} = 2,388 q^{2,659} \quad (9)$$

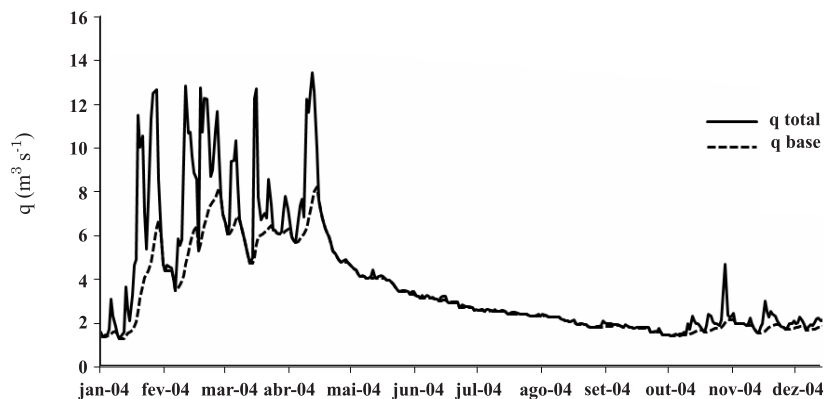


Figura 3. Decomposição do hidrograma em vazão total e escoamento de base para o ano de 2004, após a passagem do filtro digital.

em que q_{sol} ($g s^{-1}$) é a vazão sólida e q ($m^3 s^{-1}$) é a vazão líquida registrada na estação fluviométrica. O ajuste foi satisfatório, com $R^2 = 0,89$, conforme indicado no gráfico de dispersão (Figura 2).

O bom ajuste obtido entre q e q_s permitiu que a vazão sólida e o aporte de sedimento fossem extrapolados para o período de estudo (1998-2009) e tomados como dados observados (Figura 2).

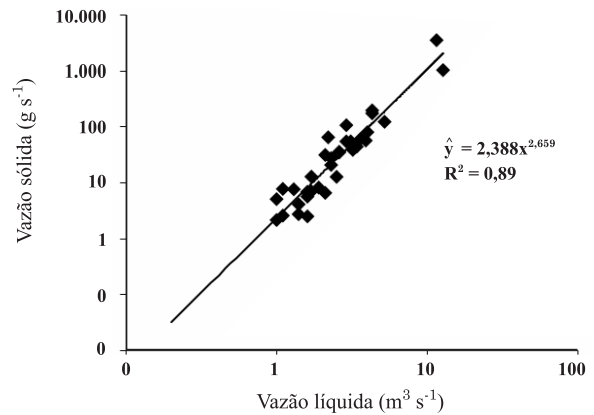


Figura 2. Correlação entre os dados observados de vazão líquida e sólida na bacia do ribeirão Pipiripau.

Calibração da MUSLE

Após a passagem do filtro digital nos hidrogramas totais da bacia (Equação 4), foram gerados hidrogramas decompostos para o período de 2000 a 2005, utilizados na calibração da MUSLE.

O hidrograma do ano de 2004 (Figura 3) ilustra a separação dos escoamentos totais e de base. A diferença entre eles corresponde ao hidrograma superficial (escoamento direto) no período. Pode-se notar que, nos meses mais secos do ano (maio a setembro), o escoamento superficial praticamente coincide com o escoamento de base, como esperado.

Isso indica bom comportamento do filtro para as condições hidrológicas da bacia estudada.

Na figura 4 é apresentada a relação obtida entre o volume de escoamento direto (Q) e a vazão de pico (q_p) nos eventos observados e usados no período de calibração da MUSLE. De acordo com essa figura, o ajuste obtido foi satisfatório, com R² = 0,70.

O quadro 1 apresenta os valores anuais das variáveis hidrossedimentológicas utilizadas no período de calibração. Os anos de 2004 e 2005 foram os mais chuvosos (valores acima de 1.500 mm); os anos de 2000 e 2003 se enquadram como anos de pluviosidade média (em torno de 1.100 mm); e 2001 e 2002 apresentaram baixos índices pluviométricos (inferiores a 1.000 mm anuais), com valores de aporte de sedimento e coeficiente de ajuste modificado seguindo a pluviosidade anual.

De acordo com o quadro 1, há correlação entre o volume de precipitação pluvial anual, o escoamento total anual e o aporte de sedimento observado anual,

o que era esperado. Observa-se também que, em sua forma original, a MUSLE superestima em quase 100 % (em média) o aporte de sedimento total anual observado na bacia.

Na figura 5 é mostrada a alta relação entre a precipitação pluvial anual e o coeficiente a_{mod} para a bacia estudada, indicando que o último é diretamente proporcional à primeira.

Com base no quadro 1, a MUSLE calibrada para a bacia do ribeirão Pipiripau teve a seguinte forma:

$$Y = 3,19 (Q q_p)^{0,56} K L S C P \quad (10)$$

tendo as variáveis da equação 10 já sido definidas anteriormente. O valor médio de 3,19 para o coeficiente a da MUSLE não privilegia os altos valores de aporte de sedimento, como ocorreria se a calibração tivesse sido feita por meio da minimização de funções objetivas de erros quadráticos, as quais privilegiam valores elevados da variável de interesse em detrimento dos menores (Yu & Yang, 2000).

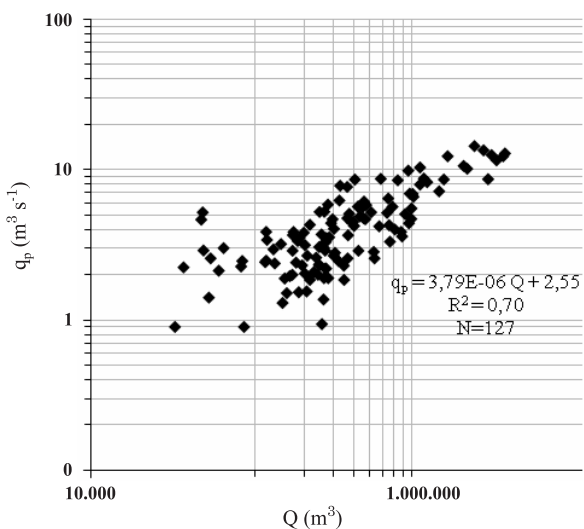


Figura 4. Relação entre Q e q_p obtida no período de calibração.

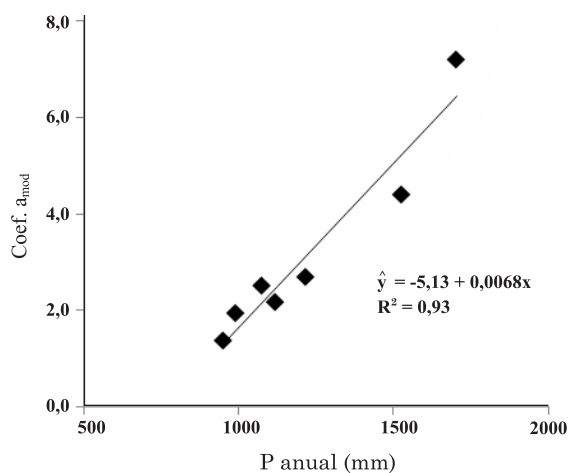


Figura 5. Relação entre o coeficiente a_{mod} anual e o volume de precipitação pluvial anual para o período de calibração do modelo.

Quadro 1. Número de eventos selecionados, volumes de precipitação pluvial anual, volumes escoados anuais, aportes de sedimento observados e calculados pela MUSLE original (totais anuais) e valores do parâmetro a modificado (a_{mod}) para os anos de calibração

Ano	Núm. eventos signific.	P anual	Q _{tot}	Y _o	Y _{MUSLE orig.}	a _{mod}
		mm		t		
1999	16	1.216,0	409,2	742,2	2.499,7	2,70
2000	24	1.074,0	289,2	766,2	2.793,8	2,52
2001	15	949,0	163,7	276,8	1.391,4	1,38
2002	22	989,0	236,2	645,4	2.388,0	1,95
2003	17	1.118,0	224,9	682,2	2.266,1	2,18
2004	23	1.703,0	579,9	5.544,0	5.449,6	7,21
2005	21	1.526,0	411,8	2.193,8	3.954,7	4,41
Médias	19,7	1.225,0	330,7	1.550,1	2.963,3	3,19

O valor calibrado de a no presente estudo é significativamente inferior ao valor da MUSLE original (Williams, 1975) e ao valor calibrado por Avanzi et al. (2007). Isso pode ter sido devido à maior dimensão da bacia do ribeirão Pípiripau (235 km²) em relação às bacias estudadas por aqueles autores (9,0 e 2,9 km², respectivamente), as quais apresentam maiores valores de relação de aporte de sedimento (RAS) que a primeira.

Validação do modelo MUSLE ajustado para a bacia

A validação do modelo ajustado (Equação 10) foi obtida pela comparação entre os valores observados e calculados (mensais e anuais) do volume do escoamento direto e do aporte de sedimento nos anos de 1998, 2006, 2007, 2008 e 2009. O valor de CN calibrado para a bacia e usado nas simulações no período de validação foi de 70,9, o que está de acordo com a literatura para as condições hidrológicas da bacia (Chaves, 2010).

Os valores observados e calculados de Q e Y anuais são mostrados nas figuras 6 e 7, respectivamente. Em termos mensais, os ajustes de Q e Y são apresentados nas figuras 8 e 9, respectivamente.

Pelos quatro gráficos de dispersão (Figuras 6, 7, 8 e 9), observa-se que, graficamente, o ajuste do escoamento direto, calculado pela equação 2, foi melhor que o do aporte de sedimento, calculado pela MUSLE modificada, tanto em nível mensal como anual. Isso era de certa forma esperado, pois, além da alta sensibilidade de Y às variáveis Q e q_p (Chaves, 1991), há propagação do erro das variáveis hidrológicas para as sedimentológicas no modelo (Chaves & Nearing, 1991).

No quadro 2 são apresentados os valores obtidos para os coeficientes de determinação (R^2) e de Nash-Sutcliffe (E) para o escoamento direto (Equação 2) e aporte de sedimento (Equação 10), em nível mensal e anual, no período de validação.

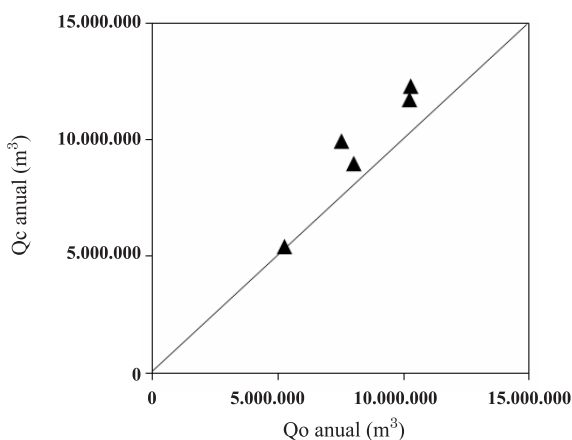


Figura 6. Valores anuais de escoamento direto observados e calculados pela equação 2 na bacia do ribeirão Pípiripau, no período de validação.

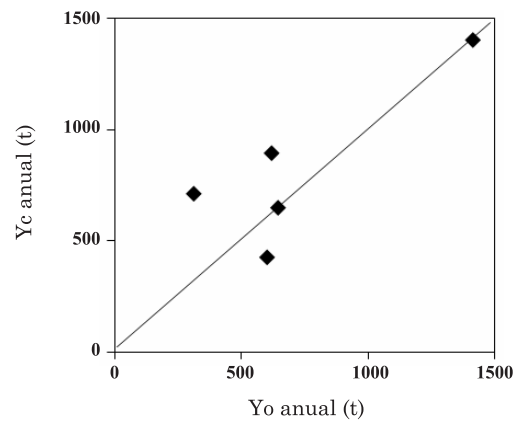


Figura 7. Valores de aporte de sedimento anual observados e calculados pela MUSLE modificada na bacia do ribeirão Pípiripau, no período de validação.

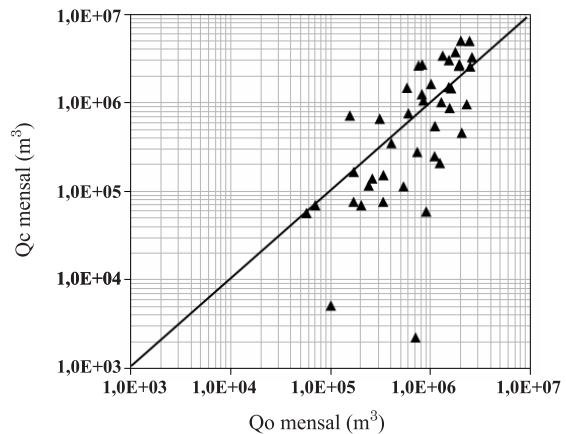


Figura 8. Valores mensais do volume de escoamento direto observados e calculados na bacia do ribeirão Pípiripau, no período de validação.

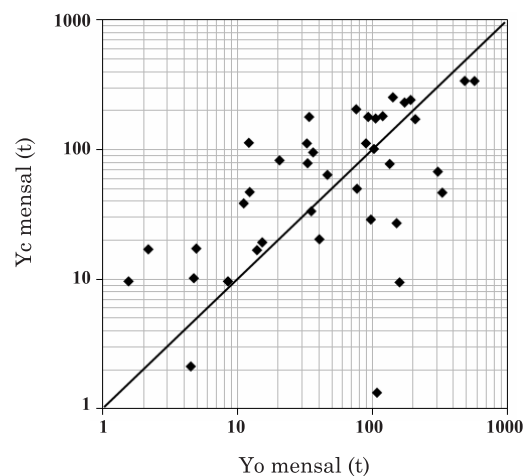


Figura 9. Valores mensais de aporte de sedimento observados e calculados na bacia do ribeirão Pípiripau, no período de validação.

Quadro 2. Coeficientes de determinação (R^2) e de Nash-Sutcliffe (E) para os escoamentos e aportes de sedimento anuais calculados pela MUSLE para a bacia do ribeirão Pipiripau no período de validação, e a qualidade do ajuste, de acordo com Moriasi et al. (2007)

Indicador	Q anual	Ajuste	Q mensal	Ajuste	Y anual	Ajuste	Y mensal	Ajuste
	m ³		m ³		t		t	
Gráfico	Fig. 6	Satisfatório	Fig. 8	Satisfatório	Fig. 7	Satisfatório	Fig. 9	Insatisfatório
R^2	0,93	Excelente	0,50	Insatisfatório	0,68	Satisfatório	0,44	Insatisfatório
E	0,24	Insatisfatório	-0,90	Insatisfatório	0,61	Satisfatório	0,43	Insatisfatório

De acordo com o quadro 2, e seguindo a classificação proposta por Moriasi et al. (2007), o ajuste do escoamento direto anual (Q anual) foi considerado satisfatório em dois dos três indicadores usados na validação; o ajuste do aporte de sedimento anual (Y anual) foi considerado satisfatório nos três indicadores. Já no caso dos valores mensais, o ajuste relativo à Q mensal foi considerado satisfatório em apenas um dos indicadores, enquanto no aporte de sedimento (Y mensal) o ajuste foi considerado insatisfatório nos três indicadores.

O melhor ajuste em nível anual pode ter ocorrido pelo cancelamento de erros no processo de agregação dos dados, com os resultados aproximando-se dos valores médios de Y e Q. Esses resultados indicam que a MUSLE modificada apresenta maior acurácia e aplicabilidade quando usada no cálculo de valores anuais de Q e Y na bacia estudada.

Se, entretanto, houver conhecimento prévio da precipitação pluvial anual, como em situações de cálculo de Y em bacias não monitoradas, a relação entre a_{mod} e P anual, indicada na figura 5, poderá melhorar consideravelmente a acurácia do modelo, uma vez que o coeficiente a da Equação 1 seria diretamente proporcional a P.

CONCLUSÕES

1. A MUSLE, na sua forma original, superestimou em cerca de 100% o aporte de sedimento na bacia do ribeirão Pipiripau. Superestimativas semelhantes ocorreriam com modelos baseados na MUSLE, como o SWAT.

2. O coeficiente de ajuste a da MUSLE passou de 11,8 (na equação original) para 3,19 (para a bacia estudada), por meio de um processo de calibração com dados hidrossedimentológicos locais.

3. No processo de validação da MUSLE, usando dados diferentes da calibração e três tipos de indicadores de acurácia, os valores anuais de escoamento direto e de aporte de sedimento apresentaram melhores ajustes que os valores mensais na bacia estudada.

4. Se a MUSLE for utilizada na estimativa de Y anual com o conhecimento prévio do volume de precipitação pluvial anual, sua acurácia será consideravelmente melhorada, uma vez que o valor de a_{mod} é diretamente proporcional a P anual.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro do CNPq-CT/Hidro (Edital 027/2008) na realização do trabalho.

LITERATURA CITADA

- AREKHI, S. Evaluating long-term annual sediment yield estimating potential of GIS interfaced MUSLE model on two micro-watersheds. *Pakistan J. Biol. Sci.*, 11:270-274, 2008.
- ARNOLD, J.G. & ALLEN, P.M. Automated methods for estimating base-flow and ground water recharge from stream-flow records. *J. Am. Water Res. Assoc.*, 35:411-424, 1999.
- AVANZI, J.C.; SILVA, M.L.N.; CURI, N.; MELLO, C.R. & FONSECA, S. Calibração e aplicação do modelo MUSLE em uma microbacia hidrográfica nos tabuleiros costeiros brasileiros. *R. Bras. Eng. Agríc. Amb.*, 12:563-569, 2008.
- BRASIL. Agência Nacional de Águas. Programa do Produtor de Água – Relatório de Diagnóstico Socioambiental da Bacia do Ribeirão Pipiripau. Brasília, 2010. 59p.
- BRASIL. Agência Nacional de Águas. Programa Produtor de Água – Manual Operativo. Brasília, 2009. 67p.
- CAESB. Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal. Plano de Proteção Ambiental da Bacia Hidrográfica do Ribeirão Pipiripau. Brasília, 2001. 206p.
- CARVALHO, N.O.; FILIZOLA, N.P.; SANTOS, P.M.C. & LIMA, J.E.F.W. Guia de práticas sedimentométricas. Brasília, ANEEL, 2000.154p.
- CHAVES, H.M.L. & NEARING, M.A. Uncertainty analysis of the WEPP soil erosion model. *Trans. ASAE*, 34:2437-2444, 1991.

- CHAVES, H.M.L. & PIAU, L.P. Efeito da variabilidade da precipitação pluvial e do uso e manejo do solo sobre o escoamento superficial e o aporte de sedimento de uma bacia hidrográfica do Distrito Federal. R. Bras. Ci. Solo, 32:333-343, 2008.
- CHAVES, H.M.L. Análise global de sensibilidade da MUSLE. R. Bras. Ci. Solo, 15:345-350, 1991.
- CHAVES, H.M.L. Modelagem matemática da erosão hídrica: Passado, presente e futuro. In: ALVAREZ, V. H., FONTES, L.E.F. & FONTES, M.P.F., eds. O solo nos grandes domínios morfo-climáticos do Brasil, e o seu desenvolvimento sustentado. UFV, Viçosa. p.731-750, 1996.
- CHAVES, H.M.L. Relações de aporte de sedimento e implicações de sua utilização no pagamento por serviço ambiental em bacias hidrográficas. R. Bras. Ci. Solo, 34:1469-1477, 2010.
- CHAVES, H.M.L.; BRAGA, B.; DOMINGUES, A. & SANTOS, D. Quantificação dos benefícios e compensações financeiras do "Programa do Produtor de Água" (ANA): I. Teoria. R. ABRH, 9:5-14, 2004.
- CHOW, V.T.; MAIDMENT, D.R. & MAYS, L.W. Applied hydrology. New York, Mc Graw-Hill, 1988. 572p.
- JAMES, L.D. & BURGESS, S.J. Selection, calibration, and testing of hydrologic models. In: HANN, C.T., ed. Hydrologic modeling of small watersheds. Ames, ASAE, 1982. p.437-472. (Nomograph, 5)
- KRAUSE, P.; BOYLE, D.P. & BASE, F. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. Adv. Geosci., 5:89-97, 2005.
- MORIASI, D.N.; ARNOLD, J.G.; van LIEW, M.W.; BINGNER, R.L.; HARMEL, R.D. & VEITH, T.L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. Trans. of the Am. Soc. Agric. & Biol. Eng., 50:885-900.
- NASH, J.E. & SUTCLIFFE, J.V. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. J. Hydrol., 10:282-290, 1970.
- SADEGHI, S.H.; MIZUYAMA, T. & VANGAH, B.G. Conformity of MUSLE estimates and erosion plot data for storm-wise sediment yield estimation. Terr. Atmos. Ocean. Sci., 18:117-128, 2007.
- SCHWAB, G.O.; FREVERT, R.K.; EDMINSTER, T.W. & BARNES, K.K. Soil and water conservation engineering. New York, Wiley, 1981. 525p.
- SHEN, Z.Y.; GONG, Y.W.; LI, Y.H.; HONG, Q.; XU, L. & LIU, R.M. A comparison of WEPP and SWAT form modeling soil erosion of the Zhangjiachong watershed in the Three Gorges reservoir area. Agric. Water Manag., 96:1435-1442, 2009.
- SRINIVASAN, R. & ARNOLD, J.G. Integration of a Basin-Scale water quality Model with GIS. Water Res. B. AWRA, 30:453-462, 1994.
- TABORGA-TORRICO, J.J. Práticas hidrológicas. Rio de Janeiro, Transcon, 1974. 120p.
- WILLIAMS, J.R. Sediment-yield prediction with universal equation using runoff energy factor. In: USDA-ARS, ed. Present and prospective technology for predicting sediment yield and sources. Washington, 1975. p.244-252.
- YANG, T. Sediment transport — Theory and practice. New York, McGraw-Hill, 1996. 396p.
- YU, P.S. & YANG, T.C. Fuzzy multi-objective function for rainfall-runoff model calibration. J. Hydrol., 238:1-14, 2000.

