

Avaliação da Produção de Sedimentos em Eventos Chuvosos em uma Pequena Bacia Hidrográfica Semi-Urbana de Encosta

Tarcisio Barcellos Bellinaso

tbellinaso@hotmail.com

João Batista Dias de Paiva

Centro de Tecnologia, Departamento de Hidráulica e Saneamento - UFSM - Santa Maria/RS

paiva@ct.ufsm.br

Recebido: 10/12/03 - revisado: 12/04/04 - aceito: 10/12/07

RESUMO

O presente trabalho teve por objetivo avaliar a produção de sedimentos em uma pequena bacia hidrográfica de encosta, em fase de urbanização, com 0,53 km² de área, a partir de medições de descarga sólida durante eventos chuvosos e compará-la com os resultados obtidos pela Equação Universal de Perda de Solo Modificada (MUSLE) apresentada por Williams (1975). Foram levantadas as características físicas da bacia hidrográfica e feito o monitoramento da precipitação, vazão e sedimentos. Foram avaliados 10 eventos medidos no período de 19 de abril de 2001 a 03 de dezembro de 2001. Os resultados mostram que a MUSLE, como método de previsão do aporte de sedimentos, se mostrou inadequada na bacia hidrográfica estudada, superestimando, os valores medidos, mesmo utilizando-se dados de volume de escoamento e vazão de pico obtidas por medições de campo. Os parâmetros da MUSLE foram ajustados para a área em estudo, obtendo-se resultados semelhantes aos obtidos por Branco (1998), para uma bacia rural situada na mesma região. Os dados observados permitiram um bom ajuste da curva-chave de sedimentos e apresentam uma boa concordância com resultados da MUSLE com parâmetros ajustados.

Palavras-chave: Monitoramento hidrossedimentométrico; MUSLE; Pequenas bacias hidrográficas.

INTRODUÇÃO

O conhecimento da produção de sedimentos em bacias hidrográficas é extremamente importante no planejamento e gestão dos recursos hídricos. Tais informações são fundamentais no dimensionamento e operação de obras hidráulicas, interferindo decisivamente nos custos de implantação e manutenção de tais sistemas. Os custos envolvidos no seu monitoramento são bastante elevados por essa razão são escassas as informações medidas a campo, em especial em pequenas bacias. Para suprir essa deficiência de informações, são utilizados modelos matemáticos que fornecem estimativas a partir de dados de tipo e uso do solo, relevo e cobertura vegetal. No entanto, os resultados obtidos do confronto de tais modelos com informações medidas têm demonstrado grandes discrepâncias com a realidade, evidenciando as incertezas envolvidas em tais aplicações. Esta realidade indica a importância de se ampliar as medições, no sentido de fornecer estas informações diretas e auxiliar no aprimoramento e

calibração de métodos e modelos de estimativa do transporte de sedimentos.

De acordo com Araújo (2001), também é importante salientar que as mudanças realizadas na cobertura vegetal e nas formas de uso do solo urbano das bacias hidrográficas, pela ação antrópica, contidas nas grandes metrópoles influenciam diretamente os regimes hidrológicos, hidráulicos, sedimentológicos e de qualidade das suas águas superficiais.

O impacto quantitativo dessas modificações é de difícil prognóstico face ao grande número de combinações entre condições climáticas, geologia, solo e suas variadas formas alternativas de cobertura.

Os modelos matemáticos têm seu uso e confiabilidade limitada devido às incertezas e empirismos na fixação dos seus vários parâmetros. Programas de observações e de medidas no campo são sempre necessários, seja como meio para se extrapolar tendências dos dados de curvas de evolução seja como fornecedor de elementos quantitativos de comparação e confirmação de previsões obtidas através dos modelos matemáticos.

O monitoramento de pequenas bacias hidrográficas apresenta sérias dificuldades, a maioria ligada ao seu regime hidrológico, uma vez que as respostas desse tipo de bacia são muito rápidas, fazendo com que nem sempre seja possível fazer as medições necessárias durante as ondas de cheia.

Esta pesquisa teve como objetivo principal, avaliar a produção, transporte e deposição de sedimentos, a partir da medição de descarga líquida e sólida, em uma pequena bacia hidrográfica de encosta em fase de urbanização, a montante do reservatório de abastecimento de água da cidade de Santa Maria/RS. Foi desenvolvido como um subprojeto do projeto de Monitoramento e Modelagem dos Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Arroio Vacacaí-Mirim, do Projeto RECOPE-REHIDRO, sub-redes 1 e 3, cuja área de atuação é a bacia do Arroio Vacacaí-Mirim, em Santa Maria, RS.

MATERIAIS E MÉTODOS

Os trabalhos na estação fluviométrica do Arroio Vacacaí-Mirim em Sítio do Tio Pedro e em toda a bacia, a montante do reservatório de abastecimento d'água do DNOS, consistiram de:

- Medidas de campo de descarga líquida;
- Medidas de campo de sedimento em suspensão;
- Medidas de campo de sedimento de fundo;
- Procedimentos laboratoriais para determinação da concentração de sedimentos em suspensão;
- Procedimentos laboratoriais para determinação da distribuição granulométrica do sedimento de fundo;
- Caracterização física e geomorfológica da bacia e sua cobertura vegetal;
- Coleta e análise de dados, com e sem precipitação, no período em estudo; e;
- Monitoramento hidrossedimentométrico na bacia.

Bacia hidrográfica estudada

Os estudos foram desenvolvidos em uma pequena bacia, de 0,53 km² de área, de encosta, em fase de urbanização nas cabeceiras da bacia do Arroio Vacacaí-Mirim (Figura 1), localizada à montante da barragem de abastecimento de água, na locali-

dade do Campestre do Menino Deus, na cidade de Santa Maria, na qual foi instalada a estação fluviométrica Sítio do Tio Pedro, na rua Lourival Pires Dutra, n° 210, em ponto cujas coordenadas geográficas são: longitude 53°47'37,6" oeste e a latitude 29°39'59,5" sul de Greenwich.

Esta estação foi operada no período de 19 de abril a 03 de dezembro de 2001, com uma estrutura calha x vertedor para a medida de vazões, ponte hidrométrica, linígrafo eletrônico com data-logger, modelo A-OTT, Thalimedes, amostrador US-DH-48, amostrador Helly-Smith, régua linimétrica e referência de nível (RN).

Dados pluviométricos

Os dados de chuva utilizados neste estudo foram obtidos da estação pluviométrica Campestre do Menino Deus, localizada na longitude 53°46'58,5" oeste de Greenwich e a latitude 29°38'32,2" sul, em Santa Maria, RS, dotada de pluviômetro eletrônico com data-logger, que permite a discretização em intervalos de tempo maiores que 1 minuto.

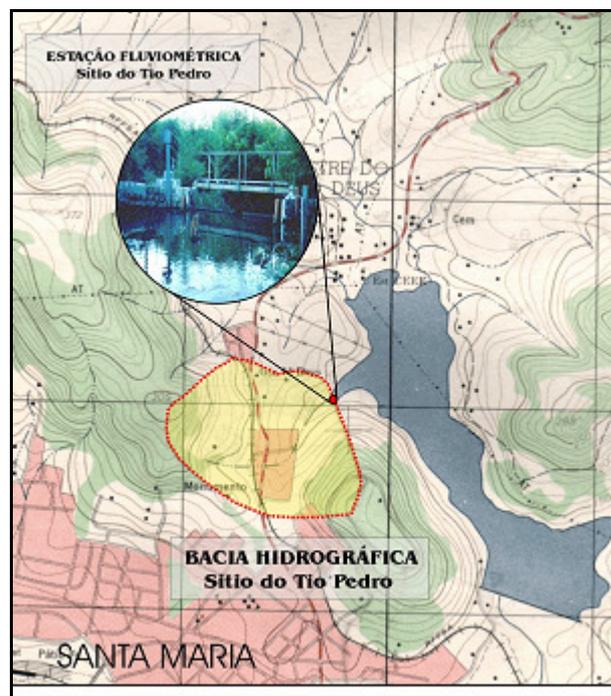


Figura 1 - Mapa da bacia hidrográfica do Arroio Vacacaí-Mirim e sua localização em relação ao reservatório do DNOS, Santa Maria/RS.

Medidas hidráulicas

Registros de cotas e medidas de descarga líquida

Para registro das cotas ao longo do tempo, fez-se uso de linígrafo eletrônico com data-logger, modelo A-OTT Thalimedes, e para a medida de velocidades utilizou-se sensor eletrônico de velocidades, modelo A-OTT Nautilus C 2000. Para a verificação do nível registrado no linígrafo no momento das medições de vazão foi utilizada a régua limimétrica.

As medidas de descarga líquida foram realizadas em uma estrutura composta de calha e vertedores (Figura 2), onde as medições foram realizadas no centro da seção da calha e nas laterais dos dois vertedores retangulares.

Características da calha de fundo plano

Conforme descrito por Alfaro (1974) a calha de fundo plano consiste de uma seção de entrada convergente de 3:1 e uma seção de saída divergente de 6:1. A calha na estação Sítio do Tio Pedro possui largura da seção de entrada de 50 cm, altura de 60 cm e comprimento de 2,00 metros.

Em virtude das vazões de cheia esperada na seção em estudo serem maiores que a capacidade de medição da calha, foram colocados dois vertedores retangulares laterais para juntamente com a calha, medir essas vazões.



Figura 2 - Calha de fundo plano, instalada na estação fluviométrica do Arroio Vacacaí-Mirim em Sítio do Tio Pedro, Santa Maria/RS.

Métodos e equipamentos utilizados

Na calha, as leituras de velocidade foram feitas 3 vezes no mesmo ponto dividindo-se a seção transversal em 3 verticais.

Foram feitas medições de velocidade nas verticais, a 60% da profundidade, localizadas a 1/6, 1/2 e 5/6 da seção, baseados em estudo realizado por Paiva & Villela (1992).

A vazão foi obtida pelo produto de cada velocidade média pela área de influência, calculadas pelo método da seção média.

$$Q = (A_1 * V_1) + (A_2 * V_2) + (A_3 * V_3) \quad (1)$$

Na qual:

Q = descarga líquida;

A₁ = área de influência da vertical 1;

A₂ = área de influência da vertical 2;

A₃ = área de influência da vertical 3;

V₁ = velocidade média do fluxo correspondente à vertical 1;

V₂ = velocidade média do fluxo correspondente à vertical 2; e;

V₃ = velocidade média do fluxo correspondente à vertical 3.

Configurações do linígrafo eletrônico Thalimedes

Na estação fluviométrica do Arroio Vacacaí-Mirim no Sítio do Tio Pedro, o linígrafo foi instalado com as configurações de intervalo de armazenamento de discretização foi de minuto em minuto.

Configurações do sensor eletrônico de velocidades utilizado

Para as medições de velocidade foi utilizado o sensor eletrônico de velocidades A-OTT Nautilus C 2000, configurado para fornecer o valor médio das velocidades pontuais medidas a cada 5 segundos, durante um minuto. Assim, a velocidade lida em cada ponto, representa a média das velocidades instantâneas lidas a cada 5 segundos durante 1 minuto.

Medidas sedimentométricas

As medidas sedimentométricas consistiram de amostragem de sedimentos em suspensão e do material do leito, análise do material coletado para determinação da concentração de sedimentos e da granulometria do material de leito e respectivos cálculos por fórmulas tradicionais.

Amostragem de sedimentos em suspensão

Para a amostragem de sedimento em suspensão, foi utilizado o amostrador AMS-1 (US-DH-48) e garrafas para coletas de amostras superficiais.

Também foram coletadas amostras superficiais na crista do vertedor, durante o período de 19 de abril a 03 de dezembro de 2001.

As coletas de amostras dos sedimentos em suspensão foram feitas com amostrador AMS-1 e as amostras superficiais, sendo o ponto de coleta na entrada, nos lados direito e esquerdo da calha com o amostrador AMS-1 e no centro da mesma para coleta de amostras superficiais durante a ocorrência das cheias.

O critério de amostragem adotado foi o enchimento de aproximadamente 2/3 da garrafa do amostrador (capacidade de aproximadamente 500 ml), para que não ocorra refluxo do material no interior da garrafa, com uma velocidade de trânsito, do aparelho, igual na subida e na descida.

A determinação da concentração de sedimentos em suspensão, em laboratório, foi feita por filtração.

Medidas de sedimento de fundo

As medidas de sedimento de fundo foram feitas com o objetivo de determinar descarga sólida de fundo e a distribuição granulométrica do material do leito e dos sedimentos transportados por arraste.

Para medidas de sedimento de fundo, foram usados o amostrador Helley-Smith, modelo proposto por Emmett (1981) e o amostrador tipo fossa sedimento, modelo descrito por Waslenchuk (1976).

As medições de descarga sólida por arraste de fundo durante eventos chuvosos foram feitas com amostrador Helley-Smith padrão (US-BL-84), modelo 8030.

Durante os períodos de estiagem, foram utilizados amostradores do tipo fossa sedimento, construídos conforme proposto por Waslenchuk (1976).

A coleta do material do leito para caracterização granulométrica foi feita com o amostrador US-BMH-53 modificado.

Caracterização hidrossedimentométrica da bacia estudada

Curva chave de vazões

Foram elaboradas relações entre vazões e cotas para a estrutura calha x vertedores laterais,

tendo sido feita uma composição das equações das curvas-chave dos resultados da calha com os vertedores, na faixa de vazões correspondentes a cota maior de 26 cm.

Curva chave de sedimento em suspensão

As curvas-chave de sedimentos em suspensão foram obtidas através da relação entre a descarga sólida Q_{ss} e da descarga líquida Q .

A variação das concentrações de sedimentos durante a passagem da cheia foi obtida a partir da determinação da concentração de amostras da mistura água+sedimento no ramo ascendente, pico de cheia e ramo descendente da onda de cheia.

Curva chave de sedimento de fundo

As curvas-chave de sedimentos de fundo foram obtidas a partir da relação entre a descarga sólida Q_f e a descarga líquida Q .

Eventos selecionados

Os eventos foram selecionados dentro da faixa de vazões medidas, e aplicadas às equações da curva-chave de sedimento em suspensão, a partir de dados obtidos com o amostrador AMS-1. Houve o cuidado de selecionar eventos que não apresentassem obstrução e entupimento na calha.

Verificando que alguns eventos situavam-se em faixas de vazões maiores que aquelas para as quais foram feitas medidas de sedimentos para a elaboração das curvas-chave, abandonou-se esses eventos utilizando-se apenas aqueles situados na faixa de vazões onde houve medições de concentração de sedimentos em pontos do ramo ascendente e descendente da curva obtida durante a passagem da onda de cheia.

Procedimentos adotados para o cálculo da produção de sedimentos

Os volumes de escoamento superficial e de descarga sólida foram obtidos utilizando-se de planimetria dos hidrogramas e sedimentogramas produzidos pelos eventos, respectivamente.

Os hidrogramas dos eventos foram obtidos plotando-se as descargas líquidas ocorridas x sua distribuição temporal.

Os sedimentogramas dos eventos selecionados foram obtidos das curvas-chave de sedimentos em suspensão.

Avaliação da Equação Universal de Perda de Solos Modificada - MUSLE

Aspectos gerais

Após a obtenção da produção de sedimentos de cada evento, os resultados foram comparados com os obtidos pela Equação Universal de Perda de Solo Modificada, para fins de comparação e para fins de ajuste de coeficientes.

Atualmente, vários modelos são utilizados para estimativa da produção de sedimento em pequenas bacias hidrográficas. Estes modelos apresentam maior ou menor nível de precisão nos resultados e nos dados de entrada, segundo suas características e objetivos. Fundamentando-se neste aspecto, pretendeu-se neste trabalho, avaliar a validade da Equação Universal de Perdas de Solo Modificada, a MUSLE (Williams, 1975), para avaliar a produção de sedimentos nesta bacia ocorrida em eventos de cheia.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Características físicas da bacia hidrográfica estudada

Na Tabela 1, são apresentadas as principais características da bacia hidrográfica estudada.

Tabela 1 - Características físicas da bacia hidrográfica estuda

Área de drenagem do posto fluviométrico (km ²)	0,53
Perímetro da bacia (km)	2,75
Comprimento do rio principal (km)	0,89
Coefficiente de compacidade (Kc)	1,05
Coefficiente de forma (Kf)	0,66
Declividade média da bacia (%)	26,8
Declividade ponderada do rio principal (m/m)	0,063
Diferença de cotas (m)	175
Altitude máxima (m)	305
Altitude mínima (m)	130

Ocupação do solo na bacia

A área em estudo encontra-se em fase de urbanização, sendo na maior parte uma área residencial em constante crescimento, onde a maioria das ruas estão pavimentadas com urbanização desordenada sem sistema público de coleta de esgotos.

Na zona de encosta está se desenvolvendo uma área de invasões com moradias precárias e sem infraestrutura sanitária. A Figura 3 mostra a ocupação do solo na bacia.

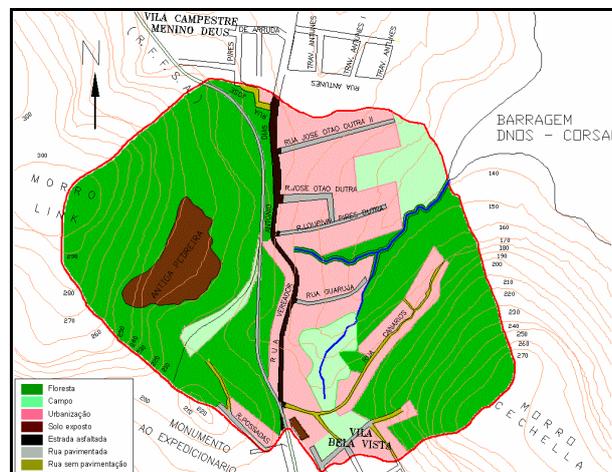


Figura 3 - Ocupação do solo na bacia hidrográfica do Arroio Vacacaí-Mirim. Santa Maria/RS, 2001.

Dados pluviométricos

Os dados pluviométricos utilizados neste estudo foram obtidos da estação pluviométrica Campestre do Menino Deus, no período destinado ao estudo, discretizados em intervalos de 10 minutos.

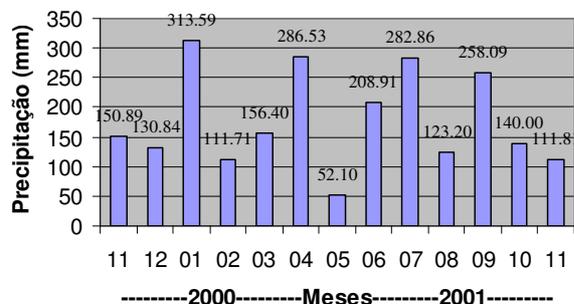


Figura 4 - Distribuição mensal da precipitação ocorrida na estação pluviométrica Campestre do Menino Deus. Santa Maria/RS, 2001.

A menor precipitação mensal foi de 52,10 mm, registrado no mês de maio de 2001, representando 2,24 %, do total precipitado no período.

A maior precipitação diária registrada no período foi de 96,35 mm no dia 30 de setembro de 2001.

A Figura 4 mostra a distribuição mensal da precipitação registrada pela estação pluviométrica Campestre do Menino Deus.

Geologia e solos

A Figura 5 apresenta o mapa da caracterização geológica da área em estudo, com suas formações e a Figura 6 apresenta a classificação pedológica do solo.

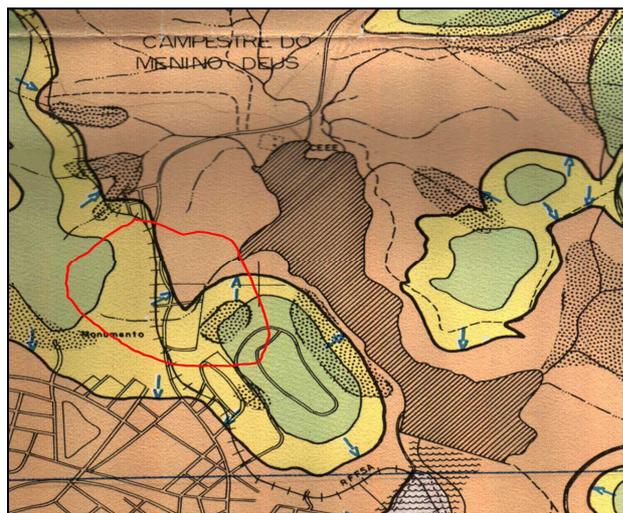
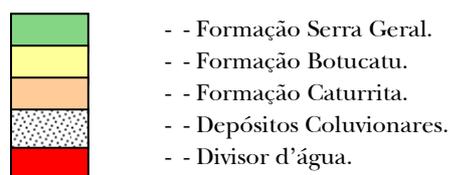


Figura 5 - Caracterização geológica da área em estudo. (Maciel Filho, 1990, Carta de Unidades Geotécnicas de Santa Maria/RS).

Legenda:



Dados de vazão

Como descrito anteriormente, as medidas de vazão na estação fluviométrica do Arroio Vacacaí-Mirim em Sítio do Tio Pedro, foram realizadas em uma estrutura calha e vertedores laterais, no período de 19 de abril de 2001 a 03 de dezembro de 2001.

A seguir apresenta-se os dados cota-vazão medidos em campo, as equações da curva-chave, os coeficientes de correlação (R^2) e os gráficos da curva-chave da calha.

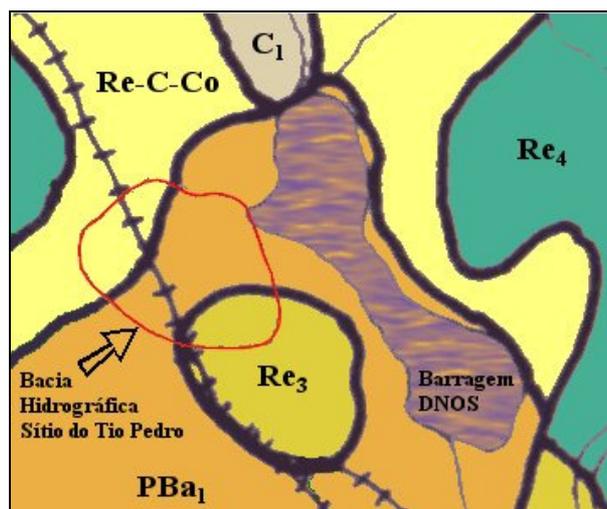
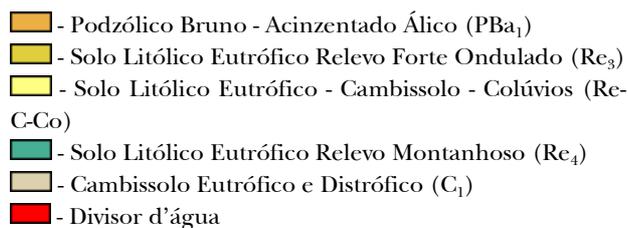


Figura 6 - Pedologia da bacia hidrográfica área estudada. (Adaptado de Azolin & Mutti, 1988, Mapa de solos da bacia hidrográfica do Arroio Vacacaí-Mirim).

Legenda:



Calha de fundo plano

A curva-chave da calha foi obtida através de 23 pares cota-vazão medidos com o sensor eletrônico de velocidades, modelo A-OTT Nautilus C 2000.

Foram elaboradas duas curvas-chave:

- a. uma para lâminas d'água menores que 26 cm ($h \leq 26$), quando a água escoia somente pela calha e os vertedores laterais não estão transbordando; e;
- b. outra para lâmina d'água maior que 26 cm ($h > 26$), quando a água escoia pela calha e pelos vertedores que estão transbordando.

Para a calha com $h \leq 26$ cm, a curva-chave foi obtida através de 15 pares cota-vazão medidos em condições reais, que é representada na Figura 7.

A equação que representa a curva-chave de vazão da calha obtida é:

$$Q = 1,0085 h^{1,8557} \text{ para } h \leq 0,26 \text{ m} \quad (2)$$

que apresentou um coeficiente de correlação $R^2 = 0,9722$. Na equação Q representa a vazão em m^3/s e “h” a cota média do nível d’água, em metros.

Para a calha com $h > 26$ cm, a equação da curva chave da seção foi obtida através de 5 pares cota-vazão medidos em condições reais.

A equação que representa a curva-chave de vazão da estrutura calha e vertedor obtida é:

$$Q = 1,0085 h^{1,8557} + 8,0116 (h - 0,26)^{1,5} + 0,015 \text{ para } h > 0,26 \text{ m} \quad (3)$$

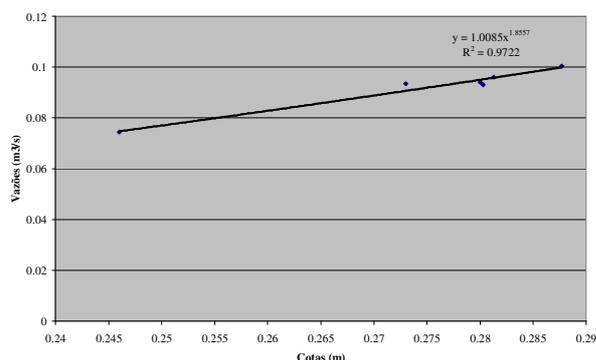


Figura 7 - Curva-chave para a calha com $h \leq 0,26$ m, da estação fluviométrica Sítio do Tio Pedro, durante o período compreendido entre 19/Abr/2001 a 30/Set/2001, Santa Maria/RS.

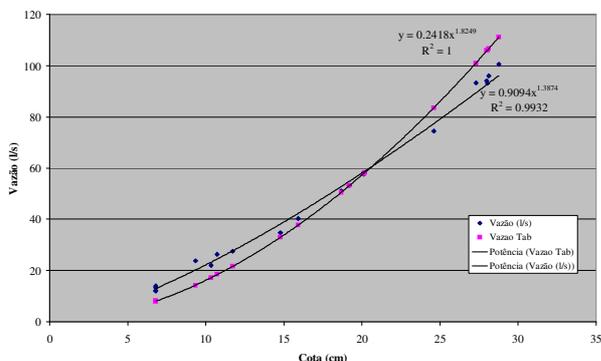


Figura 8 - Comparação da curva-chave padrão e a observada para a calha, com suas equações e coeficientes de correlação, da estação fluviométrica Sítio do Tio Pedro, no período compreendido entre 19/Abr/2001 a 30/Set/2001.

O coeficiente de correlação (R^2) e seu gráfico nesta equação não são apresentados, isto porque a calha e os vertedores laterais são estruturas de medição diferentes. Na equação Q representa a

vazão em m^3/s e “h” a cota média do nível d’água, em metros.

A Figura 8, mostra a curva-chave padrão e a observada para a calha, com suas equações e coeficientes de correlação (R^2), respectivamente.

Tabela 2 - Permanência das vazões observadas na estrutura composta calha x vertedor da estação fluviométrica Sítio do Tio Pedro, no período compreendido entre 19 de abril de 2001 a 03 de dezembro de 2001. Santa Maria/RS.

Vazões horárias ($\Delta t = 60$ min)		
Intervalo (l/s)		%
2	4	0,054855
4	8	2,194185
8	16	41,34211
16	32	33,64418
32	64	15,34101
64	128	5,046626
128	256	1,481075
256	512	0,694825
512	1024	0,146279
1024	2048	0,03657
2048	4096	0,018285
Ocorrências		5.469
Máximo (l/s)		2.448,8
Média (l/s)		30,0
Mínimo (l/s)		3,8

Permanência das vazões para a estrutura calha x vertedores

A Tabela 2, apresenta as vazões horárias e as vazões máximas, médias e mínimas observadas na estrutura composta calha x vertedores, no período compreendido entre 19 de abril de 2001 a 03 de dezembro de 2001. A vazão máxima horária observada foi de 2.448,8 l/s. A vazão mínima e média horária observada foi 3,8 l/s e 30,0 l/s, respectivamente.

A curva de duração ou permanência das vazões horárias é apresentado na Figura 9.

Dados sedimentométricos

Dados de sedimento em suspensão

A seguir, são apresentadas as figuras das curvas-chave obtidas com dados do amostrador AMS-1. O dados de amostras coletadas manualmente na superfície da água não são apresentados aqui. Isto porque, as curvas-chave não se apresentaram satisfatórias.

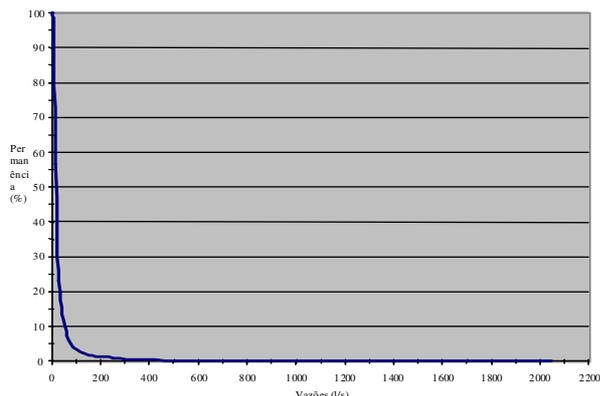


Figura 9 - Curva de permanência das vazões horárias observadas na estrutura calha x vertedores da estação fluviométrica Sítio do Tio Pedro, durante o período de 19 de abril de 2001 a 03 de dezembro de 2001. Santa Maria/RS.

Dados coletados com o amostrador AMS-1

Foram analisadas 58 amostras de mistura água+sedimento coletadas durante o período de 18 de julho de 2001 a 30 de setembro de 2001, que foram obtidas de 04 eventos de cheia que ocorreram durante esse período.

Nas equações Q_{ss} representa a descarga sólida em t/dia e a vazão em m^3/s .

Para a descida da onda da cheia e com vazão líquida $Q_l \leq 0,97$, a equação que apresenta a curva-chave de sedimento obtida é:

$$Q_{ss} = 119,69 Q_l^{1,6523} \quad (4)$$

que apresentou um coeficiente de correlação $R^2 = 0,9883$.

Para a descida da onda da cheia e com vazão líquida $Q_l > 0,97$, a equação que apresenta a curva-chave de sedimento obtida é:

$$Q_{ss} = 128,22 Q_l^{10,961} \quad (5)$$

que apresentou um coeficiente de correlação $R^2 = 0,9913$.

Para a subida da onda da cheia a equação que apresenta a curva-chave de sedimento obtida é:

$$Q_{ss} = 409,03 Q_l^2 - 144,46 Q_l + 21,732 \quad (6)$$

que apresentou um coeficiente de correlação $R^2 = 0,9852$.

Os resultados destas análises são apresentados nas Figuras 10, 11 e 12.

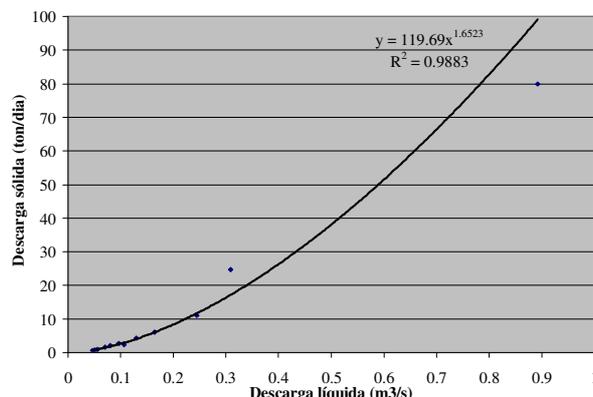


Figura 10 - Curva-chave de sedimento em suspensão para descida da onda cheia, com $Q_l \leq 0,97 m^3/s$.

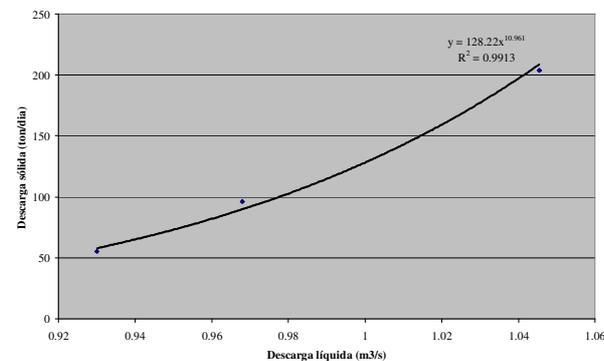


Figura 11 - Curva-chave de sedimento em suspensão para descida da onda cheia, com $Q_l > 0,97 m^3/s$.

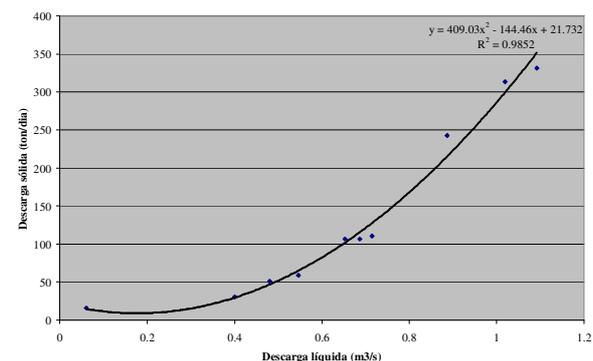


Figura 12 - Curva-chave de sedimento em suspensão para subida da onda cheia.

Dados de sedimento de fundo

Dados coletados com o amostrador Helley-Smith padrão

O amostrador foi colocado em operação durante o período de 25 de agosto de 2000 a 30 de setembro de 2001, e sua posição de coleta foi a 12 metros em relação à seção transversal, na área de aproximação à montante da estrutura calha x vertedores.

Foram analisadas 13 amostras coletadas em 10 eventos de cheia que ocorreram durante o período.

A equação que apresenta a curva-chave de sedimento de arraste de fundo, na estação fluviométrica do Sítio do Tio Pedro estudada obtida é:

$$Q_{sf} = 18185 Q^{1,7446} \tag{7}$$

que apresentou um coeficiente de correlação $R^2 = 0,9453$. Na equação Q_{sf} representa a descarga sólida em t/ano e a vazão em m^3/s . Os resultados destas análises são apresentados na Figura 13.

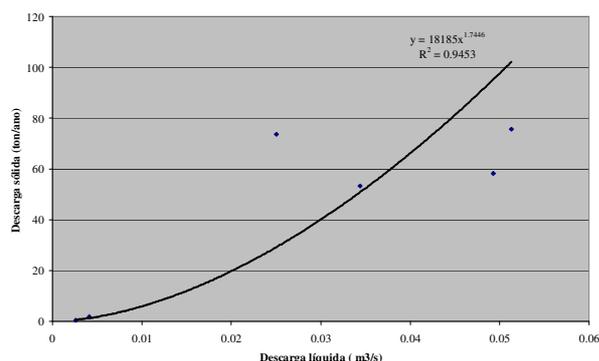


Figura 13 - Curva-chave de sedimento de arraste de fundo da estação fluviométrica Sítio do Tio Pedro, Santa Maria/RS.

Dados coletados com o amostrador Waslenchuk

As referências de níveis foram tomadas em relação ao linígrafo instalado nesta estação fluviométrica.

Foram analisadas 30 amostras coletadas no período compreendido de 4 de agosto de 2000 a 13 de agosto de 2001. Foram coletadas 27 amostras durante os períodos de estiagem e 3 amostras em evento chuvoso. Para as amostras coletadas em evento chuvoso, foi tomado o cuidado para que os amos-

tradores não transbordassem, deixando os mesmos em um período máximo de 1 hora.

Algumas dificuldades para instalação destes amostradores foram encontradas, podendo-se citar:

- a. uma cheia não prevista, devido à precipitação ocorrida durante a coleta da amostra dos mesmos, no período compreendido de 48, 72 e 96 horas, causando a perda da amostragem devido ao transbordamento dos amostradores;
- b. quando houve a ocorrência de uma cheia não prevista, com os amostradores instalados, conseqüentemente houve a perda da amostragem por causa do transbordamento dos mesmos. Com isso, os amostradores foram retirados, esvaziados e instalados novamente para uma nova amostragem. Em razão disto, em algumas ocasiões, a tela do amostrador foi rompida, já que a limpeza da deposição de sedimento sobre os amostradores era realizada com pá de corte.
- c. danos causados por vandalismo;
- d. danos causados nos amostradores em função de animais na área, face a pequena profundidade do córrego monitorado.

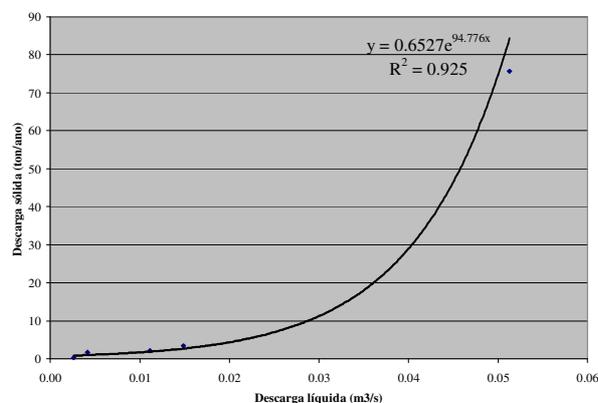


Figura 14 - Curva-chave de sedimento de fundo para valores médios do amostrador Waslenchuk.

Para o amostrador Waslenchuk, para os valores médios encontrados, a equação que apresenta a curva-chave de sedimento por arraste de fundo obtida é:

$$y = 0,6527 e^{94,776x} \tag{8}$$

que apresentou um coeficiente de correlação $R^2 = 0,925$. Na equação “y” representa a descarga sólida em t/ano e “x” a vazão em m^3/s .

Para o amostrador Waslenchuk, para todos os valores encontrados, a equação que apresenta a curva-chave de sedimento por arraste de fundo obtido é:

$$y = 0,5439 e^{100,42x} \quad (9)$$

que apresentou um coeficiente de correlação $R^2 = 0,8143$. Na equação “y” representa a descarga sólida em t/ano e “x” a vazão em m^3/s .

Os resultados destas análises são apresentados nas Figuras 14 e 15.

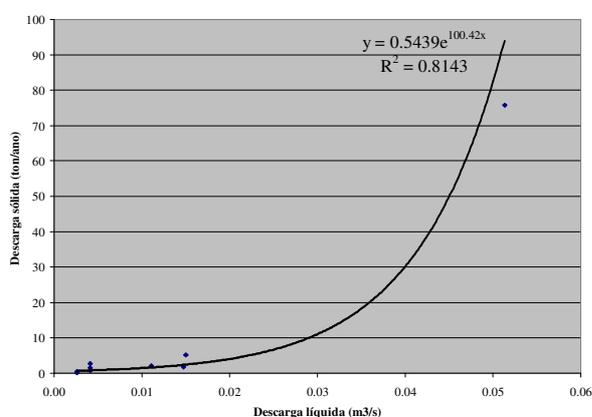


Figura 15 - Curva-chave de sedimento de fundo para o amostrador Waslenchuk.

Eventos chuvosos analisados

Durante o período estudado, compreendido entre 19 de abril de 2001 a 03 de dezembro de 2001, ocorreram, na bacia hidrográfica do Vacacaí-Mirim, 22 eventos que produziram escoamento superficial, registrados pelo linígrafo eletrônico instalado na seção de controle.

Destes, 15 eventos possuíam dados de pluviometria, linigrafia, concentração de sedimento em suspensão e descarga sólida de sedimento de fundo, que poderiam ser utilizados na análise dos resultados obtidos pela MUSLE.

Foram selecionados 10 eventos para serem analisados, sendo eles:

- evento do dia 20/Abril/2001;
- evento do dia 1/Junho/2001;
- evento do dia 11/Julho/2001;

- evento do dia 18/Julho/2001;
- evento do dia 31/Agosto/2001;
- evento do dia 7/Setembro/2001;
- evento do dia 26/Setembro/2001;
- evento do dia 30/Setembro/2001;
- evento do dia 8/Octubre/2001; e
- evento do dia 7/Novembro/2001.

Destes eventos, o que apresentou maior volume de escoamento superficial foi do dia 11/Julho/2001 ($7.639,52 m^3$), e maior vazão de pico foi do dia 07/Setembro/2001 ($1,68 m^3/s$), e o que apresentou menor volume escoado superficialmente foi do dia 20/Abril/2001 ($743,37 m^3$), a menor vazão de pico foi registrada no evento do dia 07/Novembro/2001 ($0,51 m^3/s$).

Os eventos que mais produziram descarga sólida foram os dos dias 11/Julho/2001 e 30/Setembro/2001, atingindo valores de 23,53 e 20,22 t (toneladas), associados a precipitações de 73,63 mm e 96,35 mm, respectivamente.

Resultados obtidos com a MUSLE

Para verificar se a simples aplicação da MUSLE, com os coeficientes originais sugeridos por Williams, tem validade na estação fluviométrica Sítio do Tio Pedro, foi feita a sua aplicação aos 10 eventos selecionados, utilizando os valores medidos de volume de escoamento superficial (Q_s) e vazão de pico (q_p).

Os valores dos parâmetros da MUSLE utilizados foram: $K = 0,0458281$; $LS = 15,48$; $C = 0,0210595$ e $P = 0,2$.

Os resultados obtidos pela MUSLE, apresentados na Figura 16 e na Tabela 3, mostraram que a MUSLE superestimou os valores da produção de sedimentos em todos os eventos testados.

Esta tendência de superestimar os valores, já foi observada por Kauark Leite & Mouchel (1990), em testes da aplicação da MUSLE na bacia do rio Orvergal a Melarchez, de $7 Km^2$, localizada na bacia do rio Sena, a sudeste de Paris. Kauark Leite coloca que os coeficientes a e b propostos na MUSLE, superestimam a carga de sólidos em suspensão. O mesmo autor também informa que Johnson *et al* (1985), também chegaram à mesma constatação, após estudos em quatro bacias hidrográficas nos Estados Unidos.

Goldenfum (1991), aplicando a MUSLE em 34 eventos ocorridos em duas sub-bacias do Arroio Forquetinha, localizadas na região centro-leste do estado do Rio Grande do Sul, Brasil, pertencente a bacia do rio Taquari-Antas, conclui que os resulta-

dos obtidos mostram uma tendência de superestimar os valores de produção de sedimentos em relação aos dados medidos.

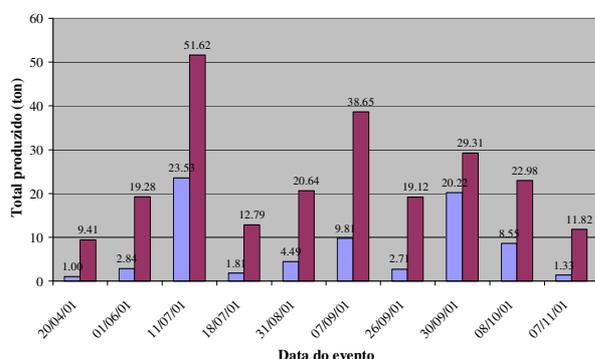


Figura 16 - Comparação dos resultados de produção de sedimentos na estação fluviométrica estudada, com dados medidos e calculados pela MUSLE.

Legenda:

- Y observado; e;
- Y calculado (musle)

Tabela 3 - Resultados da MUSLE, com valores medidos de Q_s e q_p .

Data do evento	PP (mm)	IPA dias	Q_s (m ³)	q_p (m ³ /s)	Y obs (ton)	Y calc (ton)
20/04	19,12	7	743,3	0,775	0,995	9,412
1/06	36,40	9	2.208,3	0,938	2,840	19,27
11/07	73,63	1	7.639,5	1,576	23,53	51,62
18/07	14,24	1	1.113,7	0,895	1,811	12,79
31/08	51,98	4	2.090,8	1,12	4,487	20,63
7/09	15,57	2	4.285,5	1,675	9,806	38,64
26/09	37,71	1	2.483,4	0,822	2,705	19,11
30/09	96,35	1	2.793,3	1,568	20,22	29,30
8/10	15,72	1	1.801,0	1,576	8,549	22,98
7/11	33,34	8	1.696,6	0,510	1,326	11,82

Legenda:

- PP - Precipitação (mm);
- IPA - Índice de precipitação anterior;
- Q_s - volume de escoamento superficial (m³);
- q_p - vazão de pico (m³/s);
- Y obser. - produção de sedimentos observada; e;
- Y calc. - produção de sedimentos calculada.

Branco (1998), aplicou a MUSLE em 9 eventos de cheia ocorridos em uma sub-bacia de cabeceira do arroio do Vacacaí-Mirim, ao lado da bacia objeto deste estudo e também concluiu que os resultados obtidos mostram uma tendência de superestimar os valores de produção de sedimentos em relação aos dados medidos.

Ajuste preliminar dos coeficientes “a” e “b” da MUSLE

Embora o número de dados disponíveis da bacia hidrográfica estudada seja reduzido, se faz necessário um ajuste, através destes dados, dos valores dos coeficientes a e b da MUSLE, para se verificar a possível utilização da equação ajustada às condições da bacia estudada. Este ajuste pode ser feito através do uso de técnica de regressões, admitindo-se que os demais fatores envolvidos no modelo sejam verdadeiros para a estimativa da produção de sedimentos. A Figura 17 apresenta o ajuste destes coeficientes como uma estimativa preliminar. Pode-se verificar que os valores medidos apresentam uma boa correlação com o produto entre o volume de escoamento superficial e a vazão de pico ($Q_s \cdot q_p$), com coeficiente de correlação de 0,8803. Pode-se observar que o expoente 0,56 de ($Q_s \cdot q_p$) da MUSLE ajustou com valor próximo a 1 nos valores observados.

Embora Kauark Leite & Mouchel (1990), não tenham ajustado este parâmetro, pode-se observar pelos gráficos apresentados, em seu trabalho, que o valor deste expoente seria maior que o proposto pela MUSLE. A equação abaixo apresenta a forma ajustada da MUSLE para a estação fluviométricas Sítio do Tio Pedro.

Ajuste preliminar dos coeficientes “a” e “b” da bacia estudada:

$$Y = 0,0009 \cdot (Q_s \cdot q_p)^{1,0986} \tag{10}$$

$$Y = 0,301205 \cdot (Q_s \cdot q_p)^{1,0986} \text{ K.L.S.C.P} \tag{11}$$

Branco (1998):

$$Y = 0,0001 \cdot (Q_s \cdot q_p)^{1,014} \tag{12}$$

$$Y = 0,210838 \cdot (Q_s \cdot q_p)^{1,014} \text{ K.L.S.C.P} \tag{13}$$

Williams (1975):

$$Y = 89,6 (Q_s * q_p)^{0,56} \text{ K.L.S.C.P} \tag{14}$$

Na qual:

Y - descarga sólida por evento, em t;
 Q_s - volume de escoamento superficial, em m^3 ; e ;
 q_p - vazão de pico, em m^3/s ;

O ajuste dos coeficientes do índice de erosividade ($Q_s \cdot q_p$), indicam uma tendência de aumento do expoente, passando de 0,56 a 1,0986.

Kauark Leite & Mouchel (1990) questionam o reajustamento dos parâmetros da MUSLE, dizendo que desta forma a equação perderia o seu principal objetivo, que é o de ser previsional, e considera que se os diversos fatores da equação são invariáveis no tempo e que a vazão de pico diária é fortemente correlacionada com o deflúvio diário, tornando-se uma simples relação carga-vazão.

A Figura 18 mostra a comparação dos resultados de produção de sedimentos em Sítio do Tio Pedro, com Y observado, Y ajustado e Y calculado (musle).

Tabela 4 - Ajuste da equação para previsão da descarga sólida.

Q_s (m^3)	q_p (m^3/s)	K.L.S.C .P	Y (musle)	$Q_s \cdot q_p$	Y obs (ton)	Y ajus (ton)
743,3	0,775	0,0029	9,412	576,4	0,995	0,97
2.208,3	0,938	0,0029	19,27	2.073	2,840	3,96
7.639,5	1,576	0,0029	51,62	12039	23,53	27,36
1.113,7	0,895	0,0029	12,79	997,1	1,811	1,77
2.090,8	1,12	0,0029	20,63	2.341	4,487	4,52
4.285,5	1,675	0,0029	38,64	7.179	9,806	15,50
2.483,4	0,822	0,0029	19,11	2.042	2,705	3,89
2.793,3	1,568	0,0029	29,30	4381	20,22	9,01
1.801,0	1,576	0,0029	22,98	2838	8,549	5,59
1.696,6	0,510	0,0029	11,82	866,1	1,326	1,51

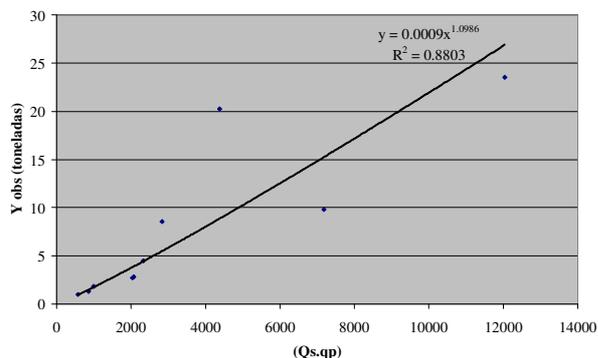


Figura 17 - Ajuste preliminar do expoente do produto ($Q_s \cdot q_p$) da MUSLE, através dos dados observados.

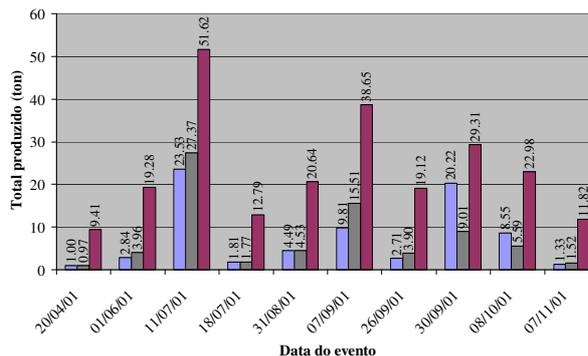


Figura 18 - Comparação dos resultados de produção de sedimentos em Sítio do Tio Pedro, com Y observado, Y ajustado e Y calculado (musle).

Legenda:

- - Y observado;
- - Y ajustado; e;
- - Y calculado (musle).

CONCLUSÕES

O presente trabalho teve por objetivo avaliar a eficiência da Equação Universal de Perda de Solo Modificada (MUSLE), Williams (1975), para estimar a produção de sedimentos em Sítio do Tio Pedro. As conclusões deste estudo são a seguir apresentadas.

Utilizando as características originais de formulação e uso propostas por Williams, a MUSLE se mostrou inadequada como método de previsão do aporte de sedimentos em Sítio do Tio Pedro.

Resultados obtidos através do estudo mostraram que a MUSLE superestima a produção de sedimentos na área, mesmo utilizando-se dados de volumes de escoamento e vazão de pico obtidos por medições de campo.

A sua utilização como modelo de previsão de aporte de sedimentos para a área estudada ou para bacias de características semelhantes deve ser realizada com cautela, tendo consciência de seus erros e limitações, a menos que sejam feitas alterações em sua formulação, ajustes em seus coeficientes e mudanças no método de estimativa de seus parâmetros.

O ajuste dos coeficientes do índice de erosividade ($Q_s \cdot q_p$), indicam uma tendência de aumento do expoente, passando de 0,56 a 1,0986.

Sugere-se aqui a continuação dos trabalhos de campo na área estudada, utilizando uma monito-

ração mais intensa e detalhada, principalmente em dados sedimentométricos e pluviométricos, para que se obtenha um número significativo de eventos a analisar e uma alta resolução temporal na representação destes eventos, de modo que se possa reavaliar a metodologia estudada.

AGRADECIMENTOS

A CAPES, pela bolsa de estudo concedida e a FINEP, pelos recursos financeiros concedidos.

REFERÊNCIAS

- ALFARO, J.F. **Medidas de águas em canais por medio del afoyador sin cuello**. 1974. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE IRRIGAÇÃO, 1., Porto Alegre, 1974. p. 461-529. Anais.
- ARAÚJO, A.M. **Evolução do processo de assoreamento em reservatório urbano**. In: CARACTERIZAÇÃO QUALI-QUANTITATIVA DA PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS. Santa Maria: ABRH/UFMS, 2001. tema 3, p. 365-372.
- AZOLIN, M.A.D. & MUTTI, L.S.M. Relatório Técnico: **Solos da bacia hidrográfica do Vacacaí-Mirim**. Porto Alegre: Acordo DNOS-UFMS, 1987-1988, 20f., p. 1-20 "não-paginado". (Não publicado).
- BRANCO, N. **Avaliação da produção de sedimentos de eventos chuvosos em uma pequena bacia hidrográfica rural de encosta**. 1998. 135f. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1998.
- EMMETT, W.W. **Measurement of bed load in rivers**. In: EROSION AND SEDIMENT TRANSPORT MEASUREMENT SYMPOSIUM, 22-26 June 1981, IAHS - AISH Publication No. 133, 1981. p. 3-15.
- GOLDENFUM, J.A. **Simulação hidrossedimentológica em pequenas bacias rurais**. 1991. 143f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas - IPH - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1991.
- JOHNSON, C.W.; GORDON, N.D. & HANSON, C.L. **North-west rangeland sediment yield analysis by the MUSLE**. Transactions of the ASAE. Volume 28. Issue 6. 1985. p. 1889-1895.
- KAUARK LEITE, L.A. & MOUCHEL, J.M. **Contribuição à modelagem da poluição difusa de origem agrícola. Transporte de sólidos em suspensão e de nitrogênio em pequenas bacias hidrográficas**. Revista Brasileira de Engenharia - Caderno de Recursos Hídricos. Rio de Janeiro: 1990. v. 8, nº 1. Dez. 1990. p. 5-20.
- MACIEL FILHO, C.L. **Carta geotécnica de Santa Maria**. Imprensa Universitária. UFSM/FINEP. Santa Maria. 1990. 21p.
- PAIVA, J.B.D. & VILLELA, S.M. **Avaliação dos critérios de amostragem da concentração de sedimentos em suspensão em rios**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 21., 1992, Santa Maria. Anais. Santa Maria: Universitária, 1992. 2 v. p. 592-605.
- WASLENCHUK, D.G. **New diver-operated bedload sampler**. In: JOURNAL OF THE HYDRAULICS DIVISION. 1976. Proceedings of the ASCE, 102 v., nº HY6, June. 1976. p. 747-757.
- WILLIAMS, J.R. **Sediment routing for agricultural watersheds**. In: WATER RESOURCES BULLETIN. 1975. Proceedings of the AWRA, Minneapolis, 11 v., nº 5, Oct. 1975. p. 965-974.

Evaluation of Sediment Production in Rainfall Events in a Small Semi-Urban Hydrographic Basin on a Slope

ABSTRACT

The purpose of the present work is evaluate sediment production from solid discharge measurements in a small 0.53 km² slope area that is undergoing urbanization, during rainfall events and compare it with results obtained by the Modified Universal Soil Loss Equation (MUSLE), Williams (1975). The physical features of the hydrographic basin were determined, monitoring precipitation, stream-flow and sediments. Ten events measured during the period from April 19th of 2001 to December 3rd of 2001 were evaluated. MUSLE, as a sediment quantity forecasting method, was inadequate in the hydrographic basin studied, overestimating the measured value, even when using data on drainage volume and peak flow obtained in field measurements. The MUSLE parameters were adjusted to the study area, and results similar to those obtained by Branco (1998) were obtained for a rural basin located in the same region. The data observed allowed a good fit of sediment-rating curve and showed agreement with results of MUSLE with adjusted parameters.

Key-words: production, transport and deposition of sediments; hydrographical basin.