

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

André Tiago dos Santos

**PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO EM UMA
MICROBACIA HIDROGRÁFICA URBANA**

Santa Maria, RS
2017

André Tiago dos Santos

**PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO EM UMA MICROBACIA
HIDROGRÁFICA URBANA**

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), Área de Concentração em Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais, como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Ambiental**.

Orientador: Dra. Malva Andrea Mancuso

Santa Maria, RS
2017

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Santos, André Tiago dos
PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO EM UMA MICROBACIA
HIDROGRÁFICA URBANA / André Tiago dos Santos.- 2017.
95 p.; 30 cm

Orientadora: Malva Andrea Mancuso
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Ambiental, RS, 2017

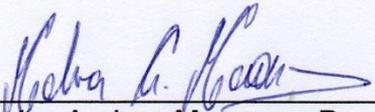
1. Áreas Urbanas 2. MUSLE 3. Sedimento I. Mancuso,
Malva Andrea II. Título.

André Tiago dos Santos

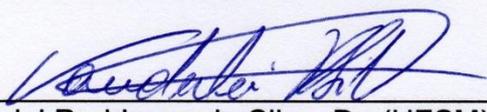
**PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO EM UMA MICROBACIA
HIDROGRÁFICA URBANA**

Dissertação apresentada ao curso de Pós -
Graduação em Engenharia Ambiental, da
Universidade Federal de Santa Maria
(UFSM, RS), Área de Concentração em
Recursos Hídricos e Tecnologias
Ambientais, da Universidade Federal de
Santa Maria (UFSM, RS) como requisito
parcial para obtenção do grau de **Mestre
em Engenharia Ambiental**.

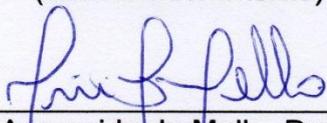
Aprovada em 28 de Julho de 2017:



Malva Andrea Mancuso, Dra. (UFSM)
(Presidente/orientadora)



Vanderlei Rodrigues da Silva, Dr. (UFSM)
(Examinador interno)



Nilvania Aparecida de Mello, Dra. (UTFPR)
(Examinadora externa)

Santa Maria, RS
2017

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha esposa Mariana e ao meu filho Victor.

AGRADECIMENTOS

- Agradeço a minha família pela compreensão e apoio interminável durante a realização deste trabalho, pois nada seria possível sem vocês.
- A minha esposa Mariana e ao meu filho Victor, vocês são os motivos que me fizeram continuar esta caminhada. Tudo isso é por vocês.
- A Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, pela educação pública e de qualidade.
- A Universidade do Oeste de Santa Catarina – UNOESC, pelo apoio financeiro e laboratorial, sem isso não seria possível a execução deste estudo.
- A professora e minha orientadora Dra. Malva Andrea Mancuso pelo apoio, paciência e por ter entendido a minha situação.
- Aos professores do PPGEAmb por terem me possibilitado uma nova oportunidade de completar o Programa de Mestrado.
- Ao professor Daniel Gustavo Allasia Piccilli pelos ensinamentos e incentivos.
- Agradeço a Rosa Maria Brito, secretária do PPGEAmb pela paciência, amizade e dedicação.
- Aos amigos e colegas de profissão, professores na UNOESC, obrigado pelo apoio.
- E a todos aqueles que contribuíram de alguma forma para que eu pudesse vencer mais esta etapa.

Muito Obrigado!

Panta Rhei
HERACLITUS

RESUMO

PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO EM UMA MICROBACIA HIDROGRÁFICA URBANA

AUTOR: André Tiago dos Santos
ORIENTADOR: Dra. Malva Andrea Mancuso

Considerando a problemática da dinâmica dos sedimentos nas áreas urbanas e a falta de informações sobre os aspectos quantitativos das produções de sedimentos em áreas urbanas, este estudo teve como objetivo avaliar a possibilidade de aplicação do modelo MUSLE tradicional e ajustada para a microbacia hidrográfica do rio Guamirim na área urbana de São Miguel do Oeste – SC. Foram utilizadas as técnicas clássicas de monitoramento para quantificação de concentração de sedimentos em suspensão (amostragem pelo igual incremento de largura) durante eventos de chuvas, no período de maio a outubro de 2016. Concomitantemente, com auxílio de uma plataforma de um Sistema de Informações Geográficas (SIG), o modelo numérico do terreno e a ortofoto do município de São Miguel do Oeste - SC foram usados para definir as feições de relevo e uso e ocupação do solo urbano. Para fim de verificação entre os valores observados e os valores calculados, foram utilizadas duas análises estatísticas: coeficiente de eficiência do modelo (COE) e erro médio quadrático (EMQ). Foram calculadas as produções de sedimentos observadas em campo durante 12 eventos de chuvas distribuídos ao longo do ano de 2016. Os resultados foram comparados com as produções de sedimentos estimadas pela MUSLE tradicional (usado coeficiente empíricos) e pela MUSLE ajustada para a microbacia urbana em estudo. Após as comparações, foi verificado que as produções de sedimentos observadas foram altas para uma área de apenas 1,49 km², totalizando nos 12 eventos 15,5 Mg de sedimentos, durante os seis meses de monitoramento. Os valores obtidos pela MUSLE tradicional subestimaram os eventos enquanto que a MUSLE ajustada superestimou as produções observadas. Como as análises estatísticas demonstraram pouca variabilidade entre o que foi observado e os valores obtidos pela MUSLE ajustada, conclui-se que a mesma pode ser utilizada na área urbana de São Miguel do Oeste, desde que os demais parâmetros do modelo não se alterem (uso e ocupação do solo).

Palavras-chave: Áreas Urbanas. MUSLE. Sedimentos.

ABSTRACT

SEDIMENT YIELD IN SUSPENSION IN AN URBAN WATERSHED

AUTHOR: André Tiago dos Santos
ADVISOR: Dra. Malva Andrea Mancuso

Considering the problem of sediment dynamics in urban areas and the lack of information on the quantitative aspects of sediment yield in urban areas, this study aimed to evaluate the possibility of applying the traditional MUSLE model adjusted to the Guamirim river watershed in the urban area of São Miguel do Oeste – SC. Classical monitoring techniques were used to quantify the concentration of suspended sediments (sampling by the same width increase) during rainfall events from May to October 2016. At the same time, with the help of a Geographic Information System (GIS) platform, the numerical model of the terrain and the orthophoto of the São Miguel do Oeste - SC town were used to define the relief features and the use and occupation of urban land. In order to verify the observed and calculated values, two statistical analyses were used: coefficient of efficiency of the model (COE) and mean square error (MSE). The sediment yields observed in the field during twelve rainfall events distributed throughout the year 2016 were calculated. The results were compared with the sediment yields estimated by the traditional MUSLE (empirical coefficient used) and the MUSLE adjusted for the urban watershed under study. The values obtained by traditional MUSLE underestimated the events while the adjusted MUSLE superestimated the observed productions. The statistical analysis showed little variability between what was observed and the values obtained by the adjusted MUSLE. It can be concluded that it can be used in the urban area of São Miguel do Oeste -SC, as long as the other parameters of the model do not change (land use and occupation).

Keywords: MUSLE. Urban Areas. Sediments.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Esquema do transporte de sedimentos nos canais fluviais.	22
Figura 2 – Indicação do fluxo de sedimentos ao longo da seção transversal, onde a cor em tons de marrom representa os maiores fluxos de transporte de sedimentos.....	23
Figura 3- Perfil da concentração de sedimentos ao longo de uma vertical.....	24
Figura 4 - Metodologia utilizada para a determinação das produções de sedimentos na área urbana de São Miguel do Oeste - SC.....	30
Figura 5- Estação Automática de Superfície de São Miguel do Oeste –SC, A857 (Código OMM 86937). Localização: -26,77705; -53,50546	31
Figura 6 - Levantamento da Seção transversal de escoamento do rio Guamirim. Localização : 248735E; 7040812N (UTM).....	33
Figura 7 - Seção de escoamento do rio Guamirim, São Miguel do Oeste. Vista para jusante. Localização : 248735E; 7040812N (UTM)	34
Figura 8 – Localização da seção transversal de escoamento do rio Guamirim, utilizada para a realização do monitoramento das descargas líquidas (Q) e de sólidos em suspensão. Localização : 248735E; 7040812N (UTM).....	35
Figura 9 - Esquema do método da meia seção para o cálculo das áreas na seção transversal do rio Guamirim. Localização : 248735E; 7040812N (UTM) ..	37
Figura 10 - Vetores de velocidades da vertical representativo das medições de vazão realizadas no rio Guamirim.....	39
Figura 11- Régua Limnimétrica localizada no rio Guamirim, São Miguel do Oeste - SC. Localização : 248735E; 7040812N e 706m de altitude (UTM).....	40
Figura 12 - Medição de vazão efetuada no rio Guamirim com molinete hidrométrico no dia 18/05/2016	43
Figura 13 - Sensor de nível d'água (HOBO, modelo U20L) instalado no rio Guamirim, ao lado da régua linimétrica. Localização : 248735E; 7040812N e 706m de altitude	46
Figura 14 - Coleta dos dados no dia 16/08/2016.....	47
Figura 15 - Caracterização do Hidrograma e do Hietograma.	48
Figura 16 - Amostrador USDH-48 para integração na vertical utilizado para coleta de sedimento em suspensão no rio Guamirim (período de maio a outubro de 2016).....	49
Figura 17 - Pipetagem para determinação de sólidos em suspensão realizadas em amostras de sedimentos coletados no rio Guamirim em 15/07/2016. Laboratório de mecânica dos Solos da Universidade do Oeste de Santa Catarina – UNOESC	51
Figura 18 - Amostras de sedimentos coletados em 18/09/2016 no rio Guamirim na estufa de evaporação (105°C / 24h) do laboratório de Saneamento da Universidade do Oeste de Santa Catarina (UNOESC).....	52
Figura 19 - Amostragem de sedimentos em suspensão com USDH-48 no rio Guamirim em 17/10/2016.....	54
Figura 20 - Bacia hidrográfica do rio Guamirim, São Miguel do Oeste - SC.....	61
Figura 21- Perfil longitudinal do rio Guamirim, São Miguel do Oeste - SC.....	62
Figura 22 – Classificação de uso e ocupação do solo urbano da bacia hidrográfica do rio Guamirim em São Miguel do Oeste - SC.....	63
Figura 23 - Perfil transversal da seção de monitoramento do rio Guamirim. Localização : 248735E; 7040812N.....	65

Figura 24- Curva-chave de descarga líquida do rio Guamirim medidos ao longo do ano de 2016 (maio a outubro)	66
Figura 25 - Curva-chave de sedimentos coletados no rio Guamirim entre no período de maio de 2016 a outubro de 2016.....	68
Figura 26 - Hidrograma e Sedimentogramas do 2° evento observado em 13/07/2016	69
Figura 27 - Hidrograma e sedimentogramas do 6° evento observado em 15/08/2016	70
Figura 28 - Relação entre Produção de Sedimentos Observada e total precipitado por evento monitorado	72
Figura 29 - Relação entre $Q_p \cdot V$ x PS observada	73
Figura 30 - Produção de sedimentos observadas, produção de sedimentos calculadas e produção de sedimentos ajustadas pela MUSLE durante os eventos de chuvas monitorados	76
Figura 31- Correlação entre as produções de sedimentos observadas e a produção de sedimentos ajustadas na bacia hidrográfica do rio Guamirim.....	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Distâncias recomendadas entre verticais para as medições de vazões em um rio, de acordo com sua largura	36
Tabela 2 - Metodologia utilizada para o cálculo da velocidade média na vertical de uma seção transversal de um rio.....	37
Tabela 3 - Distribuição relativas das classes de uso e ocupação do solo e fatores de uso manejo e conservação dos solos da bacia hidrográfica do rio Guamirim	64
Tabela 4 - Efeitos de histerese dos eventos monitorados na bacia hidrográfica do rio Guamirim, durante os meses de maio a outubro de 2016	71
Tabela 5 - Resumo geral das observações de precipitações, vazões e produções de sedimentos de maio a outubro de 2016.....	74
Tabela 6 - Concentração de Sedimentos em Suspensão em áreas urbanas.....	75
Tabela 7 - Classificação das perdas de solos e seu respectivo grau de erosão	78
Tabela 8- Avaliação do Desempenho da MUSLE calculada e ajustada para a bacia hidrográfica urbana do rio Guamirim	79

LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E SIGLAS

%	Percentual
MUSLE	Equação Universal de Perda de Solos Modificada
Mg	Megagrama (equivalente a tonelada)
ha	Hectare
PS	Produção de Sedimentos
EB	Erosão Bruta
DS	Deposição de Sedimentos
CSS	Concentração de Sedimentos em Suspensão
qss	Descarga Sólida de Sedimentos
Q	Vazão volumétrica ou descarga líquida
ILL	Igual Incremento de Largura
IID	Igual Incremento de Descarga
K	Fator Erodibilidade da MUSLE
LS	Fator Topográfico da MUSLE
CP	Fator Uso, Manejo e Conservação do Solo da MUSLE
Qp	Vazão de pico
V	Volume de água gerado pelo escoamento
M	Parâmetro da textura do solo
MNT	Modelo Numérico do Terreno
PI	Ponto Inicial de medição de vazão
PF	Ponto Final de medição de vazão
Vm	Velocidade Média
N	Rotações por segundo
p	Profundidade da vertical
A	Área
d	Distância da vertical até a margem
H ₀	Nível do rio cuja vazão é nula.
H	Nível de água ou cota limnimétrica
ln	Logaritmo natural
ETR	Equal Transit Rate
SD	Sólidos Dissolvidos
PS obs	Produção de Sedimentos Observada
PS calc	Produção de Sedimentos Calculada
PS ajust	Produção de Sedimentos Ajustada
EMQ	Erro Médio Quadrático
SIRGAS 2000	Datum de referência planimétrica para as Américas
MMQ	Método dos Mínimos Quadrados
P	Precipitação (chuva)
COE	Coefficiente de Eficiência
UFSC	Universidade Federal de Santa Maria
UNOESC	Universidade do Oeste de Santa Catarina
PPGEAmb	Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
2 OBJETIVOS	16
2.1 OBJETIVO GERAL	16
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
2 REFERENCIAL TEÓRICO	17
3.1 PROCESSOS EROSIVOS.....	17
3.2 A IMPORTÂNCIA DO MONITORAMENTO.....	18
3.3 EROÇÃO EM ÁREAS URBANAS	19
3.4 DINÂMICA DOS SEDIMENTOS NOS CURSOS D'ÁGUA.....	21
3.4.1 Variabilidade espacial e temporal do transporte de sedimentos nos rios	23
3.4.2 Técnicas de Amostragens de sedimentos em suspensão	24
3.5 MODELOS DE PREVISÃO DE PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS.....	26
4 METODOLOGIA	29
4.1 CARACTERÍSTICAS SÓCIO-ECONÔMICAS DA REGIÃO DE SÃO MIGUEL DO OESTE -SC.....	30
4.2 CARACTERIZAÇÃO DA MICROBACIA HIDROGRÁFICA	31
4.3 LEVANTAMENTOS DE DADOS DE CHUVAS (P).....	31
4.4 CARACTERÍSTICAS DO CURSO D'ÁGUA	32
4.4.1 Características da seção de monitoramento	33
4.5 DESCARGAS LÍQUIDAS DO RIO GUAMIRIM (Q)	35
4.5.1 Elaboração da curva-chave de vazões do rio Guamirim	40
4.5.2 Calibração da curva-chave	42
4.5.3 Monitoramento dos níveis d'água do rio Guamirim	45
4.5.4 Cálculo dos volumes de água gerados pelos eventos de chuva (V)	47
4.5.5 Estimativa das vazões de pico dos eventos (Qp)	48
4.6 CONCENTRAÇÃO E DESCARGA SÓLIDA DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO	49
4.6.1 Determinação da concentração de sedimentos em suspensão (CSS)	50
4.6.2 Descarga sólida de sedimentos em suspensão (qss)	53
4.7 DADOS DE ENTRADA NA EQUAÇÃO UNIVERSAL DE PERDAS DE SOLOS MODIFICADA (MUSLE)	55
4.7.1 Fator K	56
4.7.2 Fator LS	57
4.7.3 Fatores C e P	58
4.7.3 Avaliação do desempenho da MUSLE	59
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	61
5.1 CARACTERÍSTICAS FISIAGRÁFICAS DA BACIA HIDROGRÁFICA	61
5.2 TEMPO DE CONCENTRAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA	64
5.3 SEÇÃO TRANSVERSAL DO RIO GUAMIRIM NO LOCAL DE MONITORAMENTO	64
5.4 DESCARGAS LÍQUIDAS	65

5.5 ANÁLISE DE DESCARGA DE SEDIMENTOS	67
5.6 RELAÇÃO ENTRE PRECIPITAÇÃO E PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS	71
5.7 CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DA EQUAÇÃO UNIVERSAL DE PERDA DE SOLOS MODIFICADA	73
5.8 ANÁLISE ESTATÍSTICA DA MUSLE	78
6 CONCLUSÕES.....	80
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82
APÊNDICES	86

1 INTRODUÇÃO

A expansão das áreas urbanas no Brasil tem contribuído para o aumento da produção de sedimentos nas bacias hidrográficas e também no impacto sobre os parâmetros qualitativos dos recursos hídricos. Embora a erosão seja um fenômeno natural de desgaste dos solos e das rochas, a ação do homem sobre o ambiente faz com que ocorra, na maioria das vezes, uma aceleração deste processo, sendo os cursos d'água os agentes principais de recepção e transporte destas partículas. Como consequência, pode ser citada a compactação, a salinização, a lixiviação, a perda da fertilidade e a erosão (HOROWITZ, 2003).

Os termos *erosão* e *sedimentação* envolvem os processos de desprendimento, transporte e deposição de partículas sólidas, que são corriqueiramente chamadas de sedimento, podendo ocorrer em diferentes escalas espaciais e temporais. Estes sedimentos podem ser gerados por diferentes tipos de agentes, tais como a água (erosão hídrica e glacial) e vento (eólica), a maior parte dos sedimentos é oriunda da desagregação das partículas de solos pela energia cinética das chuvas. A problemática da erosão está em conhecer como variáveis e parâmetros são representados em diferentes escalas e como ocorre a transferência dos sedimentos entre as mesmas (MEDIONDO E TUCCI, 1997).

A degradação das bacias hidrográficas acelerada pelas atividades humanas, quando somadas aos fenômenos naturais (como precipitação) leva a uma produção elevada de sedimentos, ocasionando um maior aporte de sedimentos que atinge os corpos hídricos, em proporções muito maiores que a produzida na condição de equilíbrio (PAIVA, 2003).

A verificação da produção de sedimentos em uma bacia hidrográfica é realizada a partir do monitoramento quanti-qualitativo dos sedimentos, que pode ser feito por meio de coletas de dados de campo, cálculo de valores paramétricos, informações de imagens de satélites, fotos aéreas, mapas, entre outros (ALÉSIO, 2010).

A análise dos fenômenos hidrossedimentológicos que ocorrem em uma bacia hidrográfica é necessária, uma vez que o conhecimento da dinâmica dos sedimentos pode definir diretrizes para uma adequada gestão dos recursos hídricos. Assim, através do monitoramento é possível identificar as causas de degradação da bacia,

os impactos na qualidade da água, considerando os seus usos múltiplos como o abastecimento e a irrigação, o assoreamento de rios e reservatórios e as mais diversas pesquisas ambientais e de engenharia, e permitindo planejar o uso dos recursos da região de maneira racional, visando o desenvolvimento sustentável (CARVALHO, 2000).

No entanto em função do custo financeiro do monitoramento da produção de sedimentos, é importante preencher as lacunas por intermédio da representação matemática dos processos de erosão e sedimentação na bacia. Ao integrar o monitoramento convencional hidrossedimentológico com a modelagem matemática dos recursos naturais (água e solo), é possível contribuir de forma positiva para o manejo destes recursos tão importantes para sociedade, prevendo cenários futuros e permitindo a sua implementação como ferramenta de gestão.

Este trabalho visa o conhecimento da dinâmica de sedimentos na área urbana de São Miguel do Oeste – SC para propor uma alternativa ao monitoramento clássico das produções de sedimentos, mediante a utilização da Equação Universal de Perda de Solos Modificada (MUSLE), bem como auxiliar a administração pública em relação à identificação da produção e dinâmica em corpos hídricos na bacia hidrográfica do rio Guamirim em sua porção urbana, com vista a redução dos impactos ambientais negativos sobre os mesmos.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Este trabalho tem por objetivo avaliar a eficiência do modelo MUSLE para estimar a produção de sedimentos em suspensão em uma microbacia hidrográfica urbana, tendo como área piloto para o estudo a microbacia hidrográfica do rio Guamirim, em São Miguel do Oeste - SC.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1) Quantificar a produção de sedimentos por evento de chuva na microbacia urbana do rio Guamirim.
- 2) Modelar a erosão bruta da bacia hidrográfica por evento de chuva, por meio da aplicação da Equação Universal de Perdas de Solo Modificada (MUSLE) tradicional;
- 3) Modelar a erosão bruta da bacia hidrográfica por evento de chuva, por meio da aplicação da Equação Universal de Perdas de Solo Modificada (MUSLE) ajustada;
- 4) Avaliar entre as metodologias utilizadas para a estimativa da produção de sedimentos em bacia hidrográfica urbana a que melhor representa a produção de sedimentos observada em campo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 PROCESSOS EROSIVOS

A erosão é um fenômeno natural que ocorre sob determinadas condições específicas, sendo que a sua magnitude é fortemente influenciada pelas situações a que o solo (ou rocha) é submetido. Para caracterizar a erosão, é necessário que ocorra a desagregação, transporte e deposição de partículas de solo e/ou rocha. A “produção de sedimentos” pode ser considerada como o total de sedimentos que é removido para fora de uma bacia hidrográfica. No entanto, a produção de sedimentos representa somente uma parcela do total de solo que foi erodido e mobilizado em uma bacia em decorrência de todos os processos erosivos atuantes. Conforme Glymph (1954) apud Lopes (2008), a erosão hídrica é causada pelas águas das chuvas é facilitada em regiões de relevo com grandes declividades e sua deposição acontece em regiões de relevo plano como depressões próximas ao local de desagregação da partícula, sistemas lacustres, planícies de inundação e dentro do rio. Isto significa que a erosão gera impactos no local de sua formação e em outras regiões.

Minella (2007) comenta ainda que a produção de sedimentos em uma bacia hidrográfica refere-se à diferença entre a erosão bruta e a quantidade de sedimentos que não foi removida da bacia, conforme Equação 1.

$$EB = PS + DS \quad (1)$$

Sendo

EB = erosão bruta ($\text{Mg.km}^{-2}.\text{ano}^{-1}$);

PS = produção de sedimentos ($\text{Mg.km}^{-2}.\text{ano}^{-1}$) e

DS = quantidade de material depositado, retido e em trânsito na bacia ($\text{Mg.km}^{-2}.\text{ano}^{-1}$).

Nem todo o material que é desagregado de seu local de origem é transportado para fora da bacia. Isto dependerá de diversos fatores, como o tamanho da partícula, a dinâmica do escoamento, a topografia, a cobertura vegetal e das características da calha fluvial. A quantificação da deposição (DS) é muito difícil

de ser realizada devido à complexidade dos processos de transferência e deposição dos sedimentos (MINELLA, 2007).

O movimento de partículas de solo, da água e de nutrientes, bem como suas interações é governado por fenômenos que ocorrem dentro da bacia sendo determinados principalmente pela hidrologia local. Para Kobiyama (2011), esta dinâmica faz parte do ecossistema da paisagem, e desta forma, a bacia hidrográfica é a menor unidade de gerenciamento integrado dos recursos hídricos.

Os fatores que controlam a grandeza e a forma de ocorrência da produção de sedimentos são basicamente as características fisiográficas da bacia hidrográfica e o uso e o manejo do solo. O clima pode ser correlacionado com a produção de sedimentos por meio da precipitação da bacia (como o volume e a intensidade). Estas características irão determinar também a grandeza da produção de sedimentos, enquanto que a fisiografia por sua vez, governará a capacidade de transferência dos sedimentos pelos corpos hídricos (MINELLA, 2007).

Para Paiva (2003), o impacto local causado pela erosão vai desde a perda de partículas inorgânicas do solo até a perda de matéria orgânica e de nutrientes, causando prejuízos econômicos e ambientais devido a perda de fertilidade. No entanto, os problemas não se limitam a efeitos locais, pois o sedimento produzido na bacia pode causar deposição nas calhas fluviais, riscos de inundações e redução da vida útil dos reservatórios.

Considerando-se as bacias hidrográficas rurais, existem três fontes principais de sedimentos: lavouras, estradas não pavimentadas e a própria calha fluvial, onde a maior contribuição se dá através das lavouras. No entanto, Minella (2007) faz referência às estradas sem pavimentos (características das áreas agrícolas brasileiras) como potencial fonte de produção de sedimentos, uma vez que a erosão tem causado instabilização de taludes, condicionando processos de remoção em massa, gerando danos imensuráveis ao ambiente.

3.2 A IMPORTÂNCIA DO MONITORAMENTO

A água é um dos principais causadores do desprendimento de partículas de rochas e solos, que irão percorrer a encosta da bacia até atingir os cursos d'água e, por fim, alcançar o exutório contribuindo para a produção de sedimentos da bacia (LOPES, 2008).

Os processos de erosão e sedimentação numa bacia hidrográfica podem trazer muitos problemas, como por exemplo, na área agrícola que ocasiona a perda da camada superficial do solo, reduzindo sua fertilidade, aumentando os custos com insumos agrícolas, uma vez que estes nutrientes deverão ser repostos no solo a cada safra. Os sedimentos podem ainda causar o assoreamento dos rios, diminuindo a profundidade de sua calha, facilitando o seu transbordamento e, conseqüentemente, a inundação de áreas próximas as suas margens (MERTEN, 2014).

O monitoramento das bacias hidrográficas é de suma importância na gestão dos recursos hídricos fornecendo informações relevantes quanto ao efeito do uso, ocupação e preservação dos recursos hídricos. A metodologia tradicional de monitoramento hidrossedimentométrico é baseada na obtenção de uma série temporal de dados de precipitação, vazão e concentração de sedimentos que possibilitam o cálculo do fluxo de sedimentos caracterizado pela descarga sólida de sedimentos em suspensão e a produção de sedimentos.

De acordo com Minella (2007), a qualidade dos resultados será melhor quanto maior for a frequência de amostragem, entretanto, o autor indica que as principais limitações para a implementação de um monitoramento hidrosedimentométrico de alta frequência dizem respeito às dificuldades logísticas e ao alto custo de coleta e da análise da concentração.

Desta forma, observa-se que existem lacunas no conhecimento e caracterização da produção e transporte de sedimentos que impactam significativamente diversas atividades humanas.

3.3 EROSÃO EM ÁREAS URBANAS

Considera-se que as atividades agrícolas sejam responsáveis por cerca de 70 a 75% da erosão causada por atividades humanas no planeta, entretanto existem outras atividades que proporcionam uma aceleração da perda solos nas plataformas continentais (GOUDIE, 2006). Tais atividades são representadas pela expansão das áreas urbanas, construção de novas estradas e obras civis em geral. Os efeitos destas atividades, além da perda de solo, vão desde a impermeabilização do solo até as conseqüências das escavações nas obras de terra.

Leopold, em 1968, já relatava que à medida que as cidades se expandem as vazões máximas aumentam em até sete vezes, devido a impermeabilização do solo. O mesmo autor comenta ainda que a produção de sedimentos aumenta devido à superfície do solo urbano ficar desprotegida (obras, terrenos baldios, erosão em função do aumento da velocidade de água, etc.).

Estes impactos são negativos e não desejados, uma vez que a população é que sofre as consequências como é o caso das enchentes frequentes causadas não somente pelo aumento das vazões máximas, mas também pelo processo de assoreamento dos canais fluviais urbanos (TUCCI, 2005). Os sedimentos produzidos nas áreas urbanas são oriundos, na maior parte das vezes, de propriedades particulares, já que o território urbano quase na sua totalidade, pertencente a pessoas físicas e/ou jurídicas. Entretanto, quando estas partículas são transportadas para a calha fluvial o processo passa ser de caráter coletivo, ou seja, uma problemática de interesse público.

Pimentel (2006) estimou que áreas descobertas (solos expostos) podem apresentar taxas de perda que variam entre 20 a 500 $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$, e ressalva que os processos erosivos ligados a estes usos do solo são de curta duração, já que uma vez que a obra civil termina a perturbação do solo cessa.

O mesmo autor comenta que em áreas urbanas, a erosão causada por voçorocas proporcionam riscos elevados quando comparados com a erosão em entressulco, sulco e canal. Os estudos promovidos por Goudie (2006) comprovam que a construção civil num período de um ano, proporciona uma perda de solo equivalente a décadas de erosão que ocorreria de forma natural.

Após o término dos processos e/ou atividade de urbanização (obras) a perturbação no solo é cessada, o que se deve à alteração na sua cobertura, como a pavimentação de estradas e passeios públicos, a construção de jardins e gramados. Nesses casos, os valores das taxas de erosão são reduzidos aos níveis de pré-urbanização (GOUDIE, 2006).

O autor supracitado apresentou os valores de Maryland (Estados Unidos da América), aonde os mesmos chegam à ordem de 550 $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$ durante o processo de urbanização. Em áreas florestais este valor é da ordem de 1 a 2 $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$ e nas áreas agrícolas com bom manejo de solo estes valores atingem cerca de $\text{Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{ano}^{-1}$.

A Organização das Nações Unidas para Agricultura - FAO (2002) relata a perda das áreas agrícolas para a ocupação com áreas urbanas, tendo como consequência a degradação de 19,5 milhões de hectares para esta finalidade e para a construção de infraestrutura, aberturas de estradas, plantas industriais, etc.

3.4 DINÂMICA DOS SEDIMENTOS NOS CURSOS D'ÁGUA

O rio é um sistema dinâmico e de alta complexidade que visa sempre buscar o equilíbrio entre a vazão e a quantidade de sedimentos transportados. Desta forma, o sedimento que chega até ao canal possibilita que parte da energia hidráulica do escoamento seja “dissipada” no transporte das partículas de sedimentos.

Uma vez que o rio não receba uma quantidade de sedimentos adequada para manter o equilíbrio, o mesmo buscará o equilíbrio dinâmico a partir da erosão no próprio canal. Sendo assim, os sedimentos são importantes para o equilíbrio dinâmico dos cursos d'água e também pelo fato de fertilizar o solo já que nutrientes podem estar adsorvidos às partículas de sedimentos.

Entretanto, Carvalho (2000) diz que os sedimentos em suspensão causam malefícios, como a degradação da qualidade de água que afeta o seu uso para o abastecimento e, além disso, impede a penetração da luz e energia na forma de calor, reduzindo a atividade da fotossíntese necessária à saúde dos corpos d'água e assim, alterando a vida aquática.

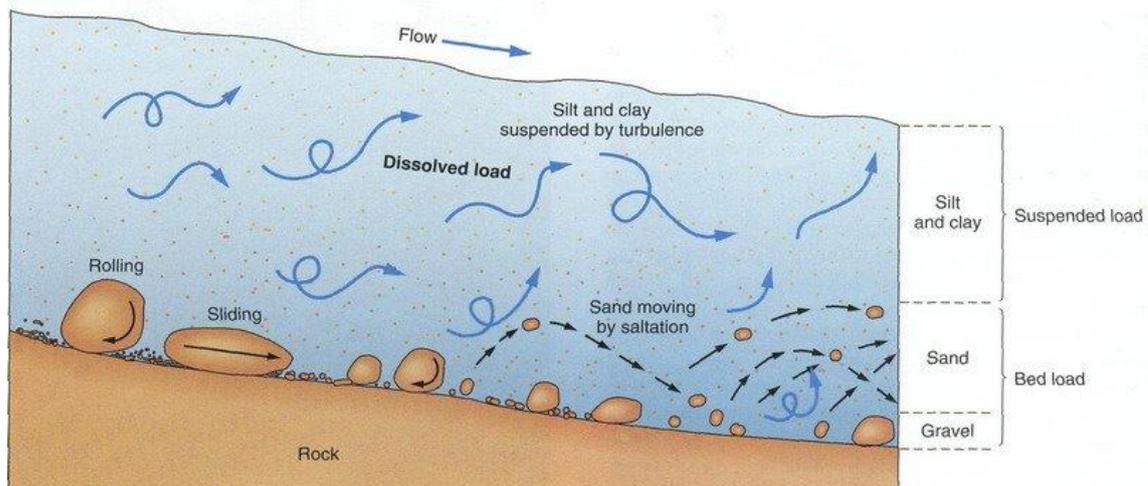
De acordo com Carvalho (2008), os sedimentos podem ser transportados num curso d'água das seguintes formas:

- 1) São denominadas **Carga Sólida de Arrasto** os sedimentos que são transportados longitudinalmente no curso d'água, movimentando-se por rolamento e/ou escorregamento. Como são partículas mais grosseiras, que estão em contato com o leito do rio durante todo o tempo.
- 2) São denominadas **Carga Sólida Saltante** os sedimentos que se movimentam saltando ao longo do canal devem o seu efeito ao fluxo d'água ou a colisão com outras partículas.
- 3) São denominadas **Carga Sólida em Suspensão** os sedimentos extremamente pequenos (com massa praticamente desprezível) que assumem praticamente a mesma velocidade do escoamento. Sua suspensão se deve às forças existentes nas

verticais das velocidades do fluxo em sincronia com as suas componentes horizontais.

Sendo assim, as partículas de sedimentos que chegam ao curso d'água têm diversas formas, tamanhos e pesos que contribuirão para o tipo de transporte dessa partícula no decorrer do curso (Figura 1).

Figura 1- Esquema do transporte de sedimentos nos canais fluviais.



Fonte: Google Imagens (2017).

Carvalho (2008) diz que o transporte de sedimentos em suspensão é superior à descarga de sedimentos de fundo, sendo que os sedimentos em suspensão correspondem a cerca de 90% a 95% de toda a descarga sólida de um rio. A descarga de fundo aumenta em relação ao material em suspensão, na medida que a erosão da bacia vai diminuindo, assim como a declividade do curso d'água (65 a 90% de sedimento em suspensão).

Uma vez que a partícula de sedimentos fica a mercê da velocidade da corrente e do seu peso, ocorre variação no transporte do material ao longo da seção transversal. Desta forma, a concentração do sedimento apresentará um mínimo na superfície e um máximo perto do leito, considerando uma granulometria variada (CARVALHO, 2000).

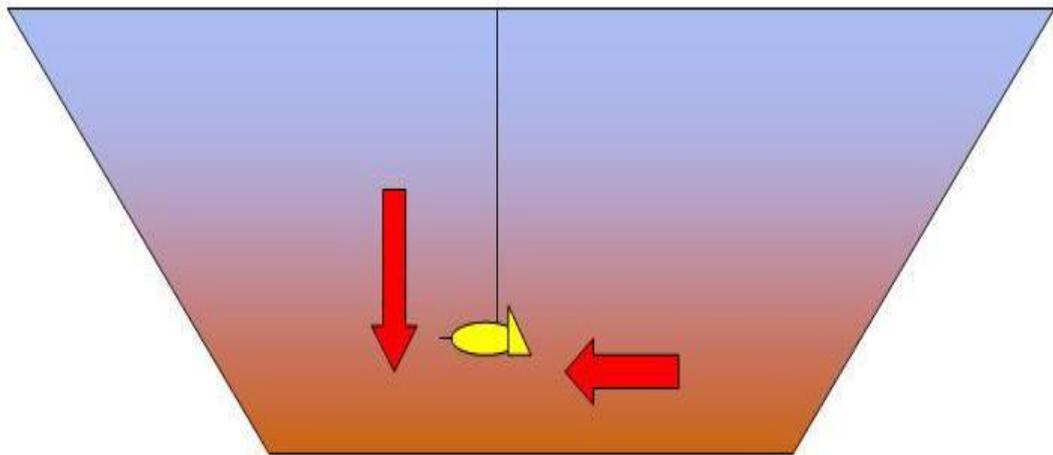
Sedimentos em suspensão de granulometria mais grosseira (areias), têm uma crescente variação no sentido superfície-leito. Já os sedimentos de menor granulometria (siltes e argilas), apresentam uma distribuição mais uniforme ao longo da vertical de um curso d'água (CARVALHO, 2000).

O conhecimento da distribuição da dinâmica dos sedimentos é necessário para o planejamento e execução da amostragem de sedimentos ao longo da seção transversal de escoamento de um curso d'água.

3.4.1 Variabilidade espacial e temporal do transporte de sedimentos nos rios

Merten et al. (2011) reforçam que a forma como os sedimentos são transportados nos canais fluviais apresenta elevada variabilidade no tempo e no espaço. Segundo o autor, a variabilidade da distribuição espacial dos sedimentos ocorre em torno das três dimensões do canal: longitudinalmente, transversalmente e verticalmente. O fluxo dos sedimentos são maiores nas proximidades do leito (Figura 2).

Figura 2 – Indicação do fluxo de sedimentos ao longo da seção transversal, onde a cor em tons de marrom representa os maiores fluxos de transporte de sedimentos

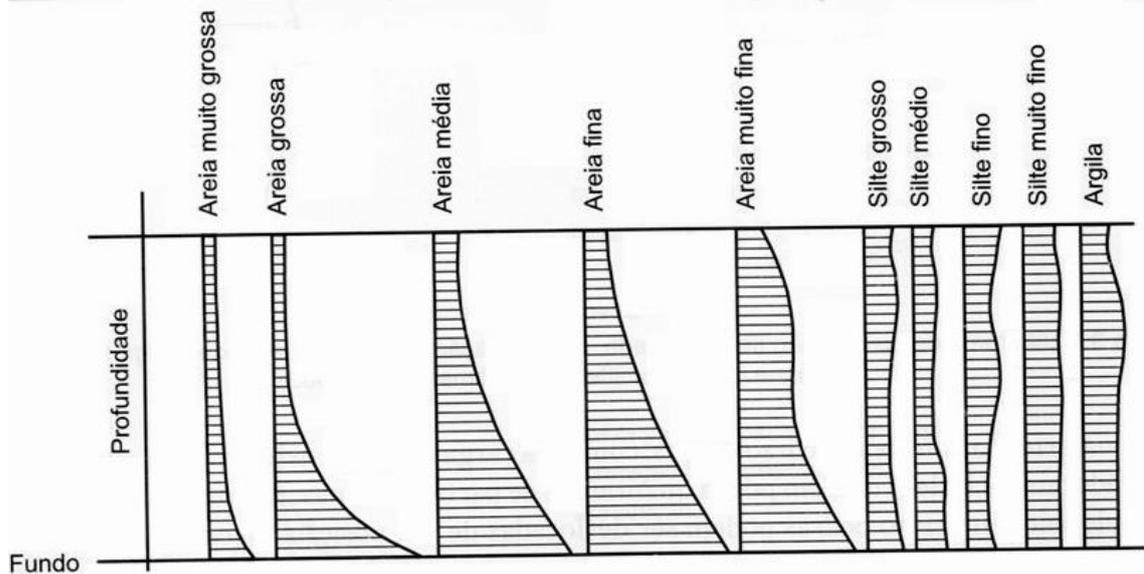


Fonte: Merten et al (2011).

Em média (mas não é uma regra), a Concentração de Sedimentos em Suspensão (CSS) apresenta maiores valores nas proximidades do centro do canal, e menores nas proximidades das margens. Isto se deve principalmente, aos vetores de velocidade da massa líquida, que normalmente obedecem a mesma relação exposta anteriormente: Valores de velocidade nulo junto as margens e ao fundo do canal (efeito da rugosidade do material de composição das margens e leito), aumentando em direção ao centro do canal (Azevedo Netto, 1998).

Dependendo da velocidade do fluxo d'água, a CSS tem tendência a aumentar junto com a profundidade já que sedimentos de maior granulometria e densidade não se distribuem de forma homogênea ao longo da vertical, como pode ser observado na Figura 3:

Figura 3- Perfil da concentração de sedimentos ao longo de uma vertical



Fonte: Carvalho (2008).

Além da variabilidade espacial, o transporte de sedimentos não ocorre de forma uniforme no tempo. Durante os eventos de precipitação é quando ocorrem os maiores aportes e transportes de sedimentos pelos cursos d'água, uma vez que a energia das chuvas é intimamente ligada ao fenômeno de desagregação e transporte das partículas de sedimentos. Ou seja, a dinâmica dos sedimentos envolve uma componente temporal que afeta a sua variabilidade espacial. Essa componente é de fundamental importância para o monitoramento, visto que a maior carga de sedimentos transportados ocorre principalmente nos eventos de chuva de maior magnitude, que são menos frequentes (HOROWITZ, 2003).

3.4.2 Técnicas de Amostragens de sedimentos em suspensão

Carvalho (2000) aponta que o termo carga de sedimentos está associado aos aspectos qualitativo dos sedimentos, enquanto que descarga de sedimentos está associado aos aspectos quantitativo dos mesmos. Sendo assim a denominação

“descarga sólida de sedimentos” (qss), representa a quantidade de sedimentos que é transportado por um curso d’água em uma dada bacia hidrográfica.

Normalmente a qss é expressa em termos de transporte de massa sólida durante um determinado tempo e suas unidades de medida são usualmente g.s^{-1} ou Mg.dia^{-1} . Quando se realiza a amostragem de sedimentos transportados por arrasto, os amostradores específicos para esta finalidade são posicionados na seção transversal e deixados nesta posição durante um determinado período. Desta forma a descarga sólida de fundo é medida de maneira direta.

Entretanto, quando se trata dos sedimentos em suspensão, são realizadas amostragens com instrumentos que coletam água com sedimentos e a descarga sólida de sedimentos em suspensão pode ser determinada posteriormente conforme Equação 2:

$$qss = 0,0864 * Q * CSS \quad (2)$$

Sendo:

qss = descarga sólida em suspensão (Mg.d^{-1}),

CSS = concentração de sedimentos em suspensão (g.m^{-3} ou mg.L^{-1}),

Q = vazão do rio ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$) e

0,0864 = fator de transformação de g.s^{-1} em Mg.d^{-1} .

Assim, a determinação de qss depende de duas variáveis fundamentais: a Concentração de Sedimentos em Suspensão (CSS) e a Descarga Líquida (Q). Desta forma, para calcular a descarga sólida em suspensão é necessário obter duas variáveis que são a concentração de sedimentos em suspensão (CSS) e a vazão (Q).

Existem metodologias específicas para a amostragem de sedimentos em suspensão e de leito, descritas por Carvalho (2000). Quando trata-se CSS, as técnicas representam basicamente os procedimentos de amostragem da mistura de água e sedimentos necessária para determinar a CSS levando-se em conta a variabilidade espaço temporal da CSS. Duas metodologias são apresentadas pelo mesmo autor: Igual Incremento de Descarga (IID) e Igual Incremento de Largura (IIL).

O método IID leva em consideração as descargas líquidas (vazões acumuladas ao longo da seção transversal, variando de 0 a 100%), onde as amostragens são realizadas segundo o critério das distribuições das vazões. O que significa que são obedecidos os critérios de incrementos iguais de vazões. Trata-se de um método bastante trabalhoso e que envolve um elevado número de verticais a serem medidas no curso d'água. Dependendo das condições hidrodinâmicas do rio, pode ocorrer uma elevada variação de nível d'água do rio entre o início e o final do procedimento, podendo inclusive perder o evento devido a esta grande amplitude (método muito demorado). Este problema é verificado em eventos de chuvas intensas ou de grandes volumes, podendo inviabilizar as amostras.

O método IIL, é o mais usual e difundido no campo de engenharia de sedimentos, devido principalmente a sua simplicidade, visto que utiliza as mesmas verticais utilizadas para a medição de descarga líquida. Em cada uma das verticais são feitas amostragens em condições isocinéticas (obedecendo a igual velocidade de trânsito do amostrador ao longo da vertical de amostragem) e de modo a integrar toda a vertical em sua profundidade.

Carvalho (2008) destaca a importância da seleção do instrumento projetado e fabricados para medir de forma direta ou indireta a qss, considerando a forma de transporte de sedimentos nos rios

3.5 MODELOS DE PREVISÃO DE PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS

Com o interesse do planejamento da gestão dos recursos hídricos, bem como o do uso e ocupação dos solos, a modelagem matemática surge como uma forma alternativa de representação da realidade dos fenômenos erosivos, que são refletidos dentro dos corpos d'água. Os modelos são simplificações da realidade, estimando quantidades físicas que tentam reproduzir as respostas da bacia após um evento pluviométrico.

Minella (2007) comenta que é necessário o conhecimento e entendimento dos algoritmos dos modelos, uma vez que os mesmos têm características distintas e foram desenvolvidos para situações específicas (validades). Isso reflete diretamente na precisão dos resultados modelados. Desta forma, é muito importante que se conheça as diferentes perspectivas dos modelos a serem utilizados, visando aumentar o grau de certeza da modelagem.

Muitos modelos foram desenvolvidos ao longo do tempo de avanço da pesquisa científica para previsão de processos erosivos. Os modelos que utilizam métodos de regressão, são considerados os mais rápidos, simples e efetivos em termos de aproximação dos valores calculados com os valores observados (WISCHEMEIER e SMITH, 1978).

O modelo proposto por Wischemeier e Smith (1978), denominado Equação Universal de Perdas de Solos (USLE, abreviação em inglês) é um destes métodos regressivos e esta representado na Equação 3:

$$Y = R * K * L * S * C * P \quad (3)$$

Sendo,

Y = Perda de solos anual calculada por unidade de área, em Mg.ha⁻¹;

R = fator climático (chuva), caracterizado como a energia da chuva para desagregar partículas de solos, em MJ.ha⁻¹.mm.h⁻¹;

K = fator erodibilidade do solo, em Mg.ha.h⁻¹.MJ⁻¹.mm⁻¹;

L e S = denominado fator topográfico, comprimento e declividade, adimensional;

C = fator de uso e manejo do solo, adimensional, e

P = fator de práticas de conservação do solo, sem dimensão.

Conforme os autores, este modelo tende a superestimar a produção de sedimentos, já que o mesmo fornece a erosão bruta da bacia EB (item 3.1), sendo a erosão total da bacia hidrográfica.

Devido a este problema, Willians (1975) fez a proposta de substituir o fator R da USLE clássica, modificando sua estrutura, passando a ser chamada de Equação Universal de Perdas de Solos Modificada (MUSLE). Esta proposta de um novo modelo de predição das perdas de solos, agora poderia ser utilizada para a estimativa da produção de sedimentos (PS) para cada evento de chuva. O fator R da MUSLE clássica foi substituído por um fator de volume e vazão de pico (máxima) gerado pelo hidrograma do curso d'água. Desta forma, a equação modificada foi representada conforme a Equação 4:

$$PS = a(Q_p * V)^b K.L.S.C.P \quad (4)$$

Sendo:

PS = perda de solo por área no tempo (Mg),

V = volume de água gerado por um evento de chuva (m^3);

Qp = vazão de pico gerado por um evento de chuva ($m^3 \cdot s^{-1}$);

a e b = parâmetros calibrados para cada bacia. No caso da MUSLE clássica os mesmos valem 0,0009 e 0,56, respectivamente;

K = fator de erodibilidade do solo ($Mg \cdot h \cdot MJ^{-1} \cdot mm^{-1}$);

LS = fator conjunto de comprimento de rampa e grau de declividade (adimensional);

C = fator uso e manejo (adimensional), e

P = fator de prática conservacionista (adimensional).

Para Carvalho (2008), a MUSLE pode ser utilizada para:

- Predizer as perdas de solo por erosão hídrica em entressulco;
- Definir as melhores práticas de conservação do solo a partir da previsão de erosão;
- Manter o processo erosivo dentro dos padrões aceitáveis para cada região;
- Pesquisas científicas, etc.

4 METODOLOGIA

Para atingir os objetivos deste trabalho foi feita selecionada uma área piloto para o desenvolvimento do estudo. A área piloto selecionada foi a microbacia hidrográfica do rio Guamirim, em sua parte urbana, em São Miguel do Oeste – SC. Foi instalado um posto hidrossedimentométrico composto de um sensor de nível automático, seção de réguas limnimétricas, ponto de início e fim das medições de vazões e amostragens de sedimentos em suspensão. As amostragens de sedimentos em suspensão foram realizadas nos eventos de chuva, bem como as medidas de vazões líquidas. As atividades de coleta de dados pluviométricos e fluviométricos são detalhadas nos itens 4.3 e 4.5, respectivamente.

A partir da coleta de amostras de sedimentos em suspensão (item 4.6), foram determinadas em laboratório as concentrações em 12 eventos de chuva que ocorreram entres os meses de maio de 2016 a outubro de 2016.

Uma segunda etapa consistiu na análise dos dados a partir de planilhas eletrônicas e elaboração de mapas utilizando-se software de geoprocessamento com o intuito de obter informações das características fisiográficas da bacia hidrográfica em estudo. Para isto foram utilizadas as informações do aerolevanteamento realizado entre 2010 e 2013 no Estado de Santa Catarina com elevado grau de detalhamento, na escala 1:10000 (Secretaria do Desenvolvimento Social do Estado de Santa Catarina, 2016).

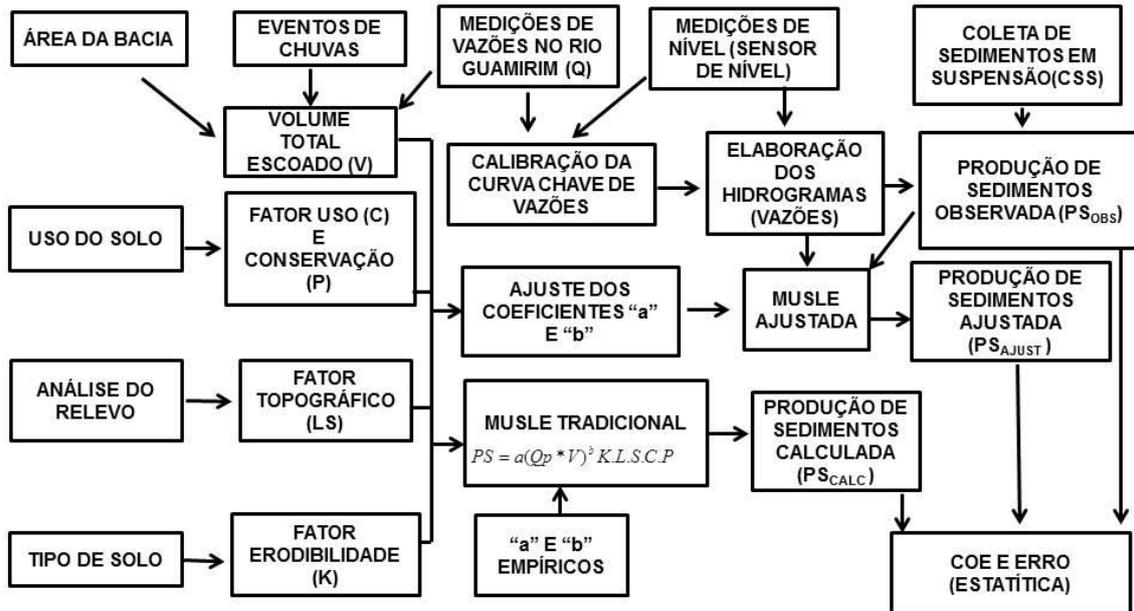
A escolha da área piloto foi devido a poucos estudos utilizando a MUSLE em microbacias hidrográficas em áreas urbanas, a proximidade de um posto pluviográfico e também a qualidade dos dados de entrada da modelagem (modelo numérico do terreno, ortofoto). A descrição detalhada da área piloto encontra-se no item 4.2.

O estudo foi organizado em 3 etapas principais:

- 1) Coleta de dados em campo;
- 2) Aplicação de modelos matemáticos de predição de perda de solos;
- 3) Análise comparativa entre os modelos aplicados a área piloto.

A Figura 4 apresenta de forma resumida a sequência utilizada para a elaboração deste trabalho.

Figura 4 - Metodologia utilizada para a determinação das produções de sedimentos na área urbana de São Miguel do Oeste - SC



Fonte: O autor.

4.1 CARACTERÍSTICAS SÓCIO-ECONÔMICAS DA REGIÃO DE SÃO MIGUEL DO OESTE -SC

A microrregião de São Miguel do Oeste têm uma população aproximada de 174732 habitantes distribuída nos 21 municípios, totalizando uma área territorial de 4251 km² aproximadamente. Apresenta uma densidade populacional de 41,1 hab.km⁻², sendo que 34% da população vive no meio rural e 66% em áreas urbanas (IBGE, 2016).

O município de São Miguel do Oeste está localizado na região do extremo oeste catarinense e apresenta uma extensão territorial de 234,57 km², população de 39352 habitantes (IBGE 2016) e densidade demográfica de 167,8 habitantes.km⁻².

No aspecto econômico, a renda média per capita anual é de R\$ 20341,47 e a região é considerada agrícola, já que compreende aproximadamente 35% do Valor Agregado Bruto (VAB) e 54% da população da região ainda está inserida na produção agrícola de soja, trigo e milho. Porém, observa-se um crescimento significativo na pecuária, na produção de leite, de suínos e de aves para agroindústrias.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DA MICROBACIA HIDROGRÁFICA

Para a caracterização da bacia hidrográfica foram utilizados os dados de um levantamento aerofotogramétrico contratado pelo Estado de Santa Catarina no ano de 2013 (Secretaria do Desenvolvimento Social do Estado de Santa Catarina, 2016). A partir deste levantamento, foi utilizado o modelo numérico do terreno (MNT) para delimitação automática da microbacia hidrográfica do rio Guamirim com o auxílio do *software ArcGIS 10.1* (ESRI, 2016).

Além da delimitação da bacia foram calculados as seguintes características fisiográficas: área de drenagem, perímetro da bacia, comprimento axial da bacia, fator de forma, índice de compacidade e declividade da bacia.

4.3 LEVANTAMENTOS DE DADOS DE CHUVAS (P)

Os dados de chuvas foram obtidos a partir da estação automática de superfície do INMET, localizada junto ao aeroporto municipal de São Miguel do Oeste – SC (Figura 5).

Figura 5- Estação Automática de Superfície de São Miguel do Oeste –SC, A857 (Código OMM 86937). Localização: -26,77705; -53,50546



Fonte: Inmet, 2016.

A estação possui o código da Organização Mundial de Meteorologia 86937 e está situada a cerca de 4 km de distância o local de monitoramento hidrossedimentológico.

A estação meteorológica de superfície automática é composta de uma unidade de memória central ("data logger"), ligada a vários sensores dos parâmetros meteorológicos (pressão atmosférica, temperatura e umidade relativa do ar, precipitação, radiação solar, direção e velocidade do vento, etc), que integra os valores observados minuto a minuto e os disponibiliza automaticamente a cada hora.

Após cada evento e depois do término de cada mês de vigência do estudo, foi realizado o download dos dados de chuva, que são atualizados a cada 1 hora. Desta forma, foi possível estimar as intensidades de chuvas durante os eventos.

4.4 CARACTERÍSTICAS DO CURSO D'ÁGUA

Com base no modelo numérico do terreno (MNT) foi elaborado o perfil longitudinal do rio Guamirim em sua porção urbana. Foram determinadas as características físicas do rio e da bacia, tais como: comprimento da drenagem principal, declividade média do rio, densidade de drenagem, extensão canalizada e não canalizada.

A seção transversal de monitoramento foi medida a partir de levantamento topográfico (Figura 6), realizado com nível topográfico (marca FOIF, modelo T202) e mira topográfica sendo estes instrumentos padronizados e os métodos indicados pela norma técnica NBR 13133/94, que rege os levantamentos topográficos.

Figura 6 - Levantamento da Seção transversal de escoamento do rio Guamirim. Localização : 248735E; 7040812N (UTM)



Fonte: O autor.

A determinação da seção transversal de escoamento é importante, pois a mesma apresenta informações dos níveis máximos que o rio pode atingir e também permite extrapolações das características hidráulicas de escoamento. Uma constante verificação de sua variação ao longo do tempo se faz necessária para verificar possível modificação da geometria no tempo e no espaço.

4.4.1 Características da seção de monitoramento

A seção transversal foi o local definido para as medições de vazões líquidas e concentrações de sedimentos durante o monitoramento (Figura 7).

Figura 7 - Seção de escoamento do rio Guamirim, São Miguel do Oeste. Vista para jusante. Localização : 248735E; 7040812N (UTM)



Fonte: O autor.

A seção de monitoramento foi selecionada considerando um trecho retilíneo do curso d'água, com margens paralelas, seção estável em termos erosivos e, ainda, que fosse um lugar seguro para abrigar os equipamentos hidrométrico. O local de monitoramento está situado atrás da delegacia da policia civil de São Miguel do Oeste - SC. O fator geométrico e o perfil da seção foram considerados com vista a garantir a confiabilidade e a precisão dos dados coletados.

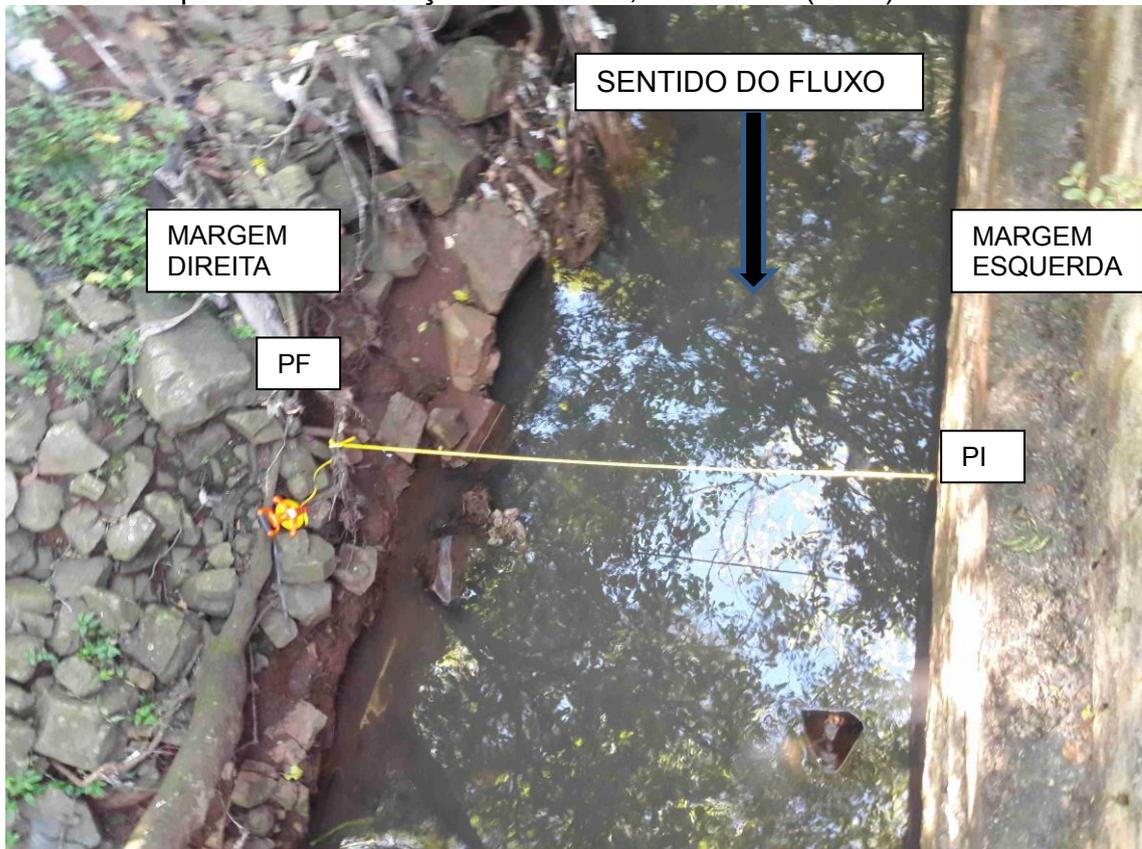
Na Figura 6 citada acima pode se perceber uma queda d'água no trecho a jusante do ponto de monitoramento. Esta queda favorece a relação entre cota e vazão, garantido um melhor ajuste do modelo matemático de vazões. Isto se deve ao fato da queda obrigar o escoamento a passar pelo regime crítico, cujo número de Froude é 1. Nestas condições, atinge-se uma condição hidráulica favorável ao escoamento.

4.5 DESCARGAS LÍQUIDAS DO RIO GUAMIRIM (Q)

Para realizar as estimativas das descargas líquidas do rio Guamirim foram coletados dados de vazões com o auxílio dos seguintes equipamentos: molinete hidrométrico (Marca JCTM e modelo MLN-7), haste para medição à vau, conta-giros (Marca JCTM e modelo CPD-20) e materiais para anotações dos dados.

A seção transversal utilizada para calcular as vazões do rio foi definida a partir de uma trena amarrada no Ponto Inicial da margem esquerda (PI) e no Ponto Final da margem direita (PF), conforme Figura 8.

Figura 8 – Localização da seção transversal de escoamento do rio Guamirim, utilizada para a realização do monitoramento das descargas líquidas (Q) e de sólidos em suspensão. Localização : 248735E; 7040812N (UTM)



Fonte: O autor.

Após, foi feito em levantamento topográfico na seção de escoamento a fim de se verificar a geometria do canal fluvial.

Para o cálculo das descargas líquidas do rio Guamirim, foi utilizada como base a Equação 5 na qual a vazão é obtida através do produto da área de escoamento pela velocidade média do fluxo:

$$Q = A * V_m \quad (5)$$

Sendo,

Q = descarga líquida em $m^3.s^{-1}$

A = área em m^2 e

V_m = velocidade média em $m.s^{-1}$

Para as medidas de velocidades foi utilizado o molinete hidrométrico (Marca JCTM e modelo MLN-7) que apresenta a seguinte equação de funcionamento (Equação 6):

$$V_m = 0,2734 * N + 0,0217 \quad (6)$$

Sendo,

V_m = velocidade pontual em $m.s^{-1}$

N = número de rotações por segundo.

O número de pontos de determinação da velocidade foi definido de acordo com a profundidade do rio. As Tabelas 1 e 2 apresentam os critérios para seleção do número de pontos e da posição estimada do instrumento para a tomada de dados, bem como o número de verticais, as medidas das velocidades e seu respectivo cálculo.

Tabela 1- Distâncias recomendadas entre verticais para as medições de vazões em um rio, de acordo com sua largura

Largura do rio (m)	Distância entre verticais (m)
<3,0	0,30
3,0 a 6,0	0,50
6,0 a 15,0	1,00
15,0 a 30,0	2,00
30,0 a 50,0	3,00
50,0 a 80,0	4,00
80,0 a 150,0	6,00
150,0 a 250,0	8,00
> 250,0	12,00

Fonte: Santos (2001).

As distâncias recomendadas consideradas como referência para as medições atuais de vazões em canais naturais (rios) no Brasil.

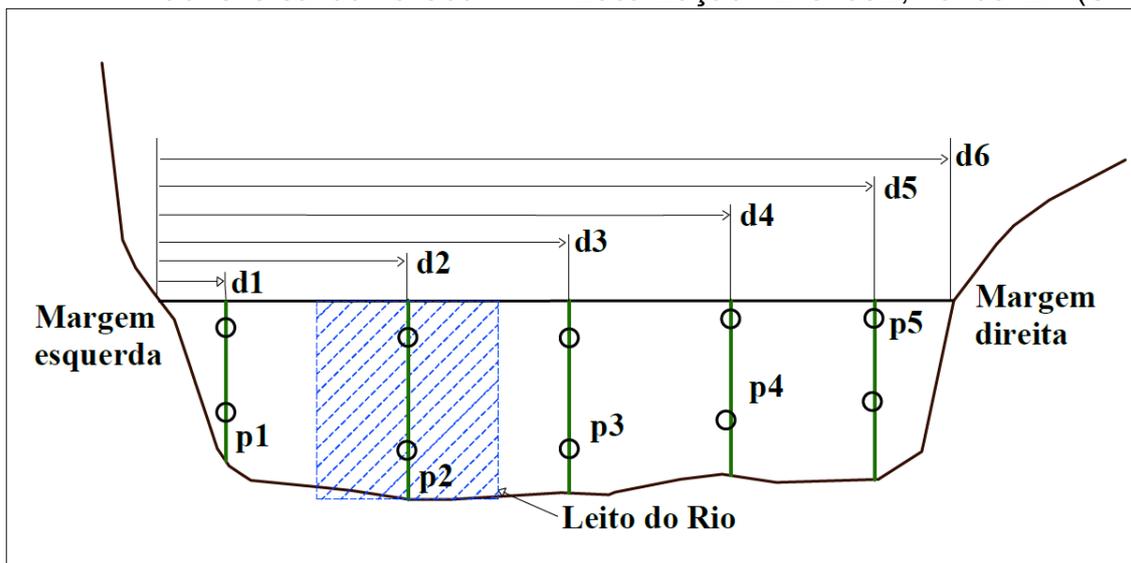
Tabela 2 - Metodologia utilizada para o cálculo da velocidade média na vertical de uma seção transversal de um rio

Número de pontos	Posição na vertical p (m)	Velocidade média Vm (m/s)	Profundidade (m)
1	0,6p	$V_m = V_{0,6}$	0,15 a 0,60
2	0,2p e 0,8p	$V_m = (V_{0,2} + V_{0,8})/2$	0,60 a 1,20
3	0,2p; 0,6p e 0,8p	$V_m = (V_{0,2} + 2V_{0,6} + V_{0,8})/4$	1,20 a 2,00
4	0,2p; 0,4p; 0,6p e 0,8p	$V_m = (V_{0,2} + 2V_{0,4} + 2V_{0,6} + V_{0,8})/6$	2,00 a 4,00
6	S; 0,2p; 0,4p; 0,6p; 0,8p e F (*)	$V_m = (V_S + 2V_{0,2} + 2V_{0,4} + 2V_{0,6} + V_{0,8} + V_F)/10$	> 4,00

(*) S = Superfície; F = Fundo; Vm = velocidade média; V = velocidade
 Fonte: Santos, 2001.

Para o cálculo das áreas foi usado o método da Meia Seção, metodologia proposta por Santos (2001), conforme Figura 9.

Figura 9 - Esquema do método da meia seção para o cálculo das áreas na seção transversal do rio Guamirim. Localização : 248735E; 7040812N (UTM)



Fonte: O autor.

Este método consistiu no levantamento da seção de escoamento em campo a partir de sua batimetria em cada um dos 12 eventos monitorados. A batimetria compreende a obtenção da largura do canal na seção de escoamento e as profundidades ao longo dessa seção. A partir destas informações foi elaborado o perfil da seção de escoamento e realizada a determinação das áreas usadas nos

cálculos de vazões. A precisão dessas informações reflete na representatividade dos dados de descarga líquida do rio naquele instante.

O levantamento topobatimétrico é uma das principais fontes de erro em medições de vazões em rios (Santos, 2001), uma vez que os instrumentos de medição (como trenas, balizas, etc.) possuem limitações próprias e, dependendo da situação em que o rio se encontra no momento da medição (uma cheia, por exemplo), a qualidade do dado medido pode ser prejudicada.

A área de cada setor apresentada na Figura 9 (hachura), foi calculada a partir da Equação 7:

$$A_i = p_i \times \left(\frac{d_i + d_{i+1}}{2} - \frac{d_{i-1} + d_i}{2} \right) \quad (7)$$

Sendo,

A_i = área do setor em m^2 ;

i = vertical que está sendo considerada;

p = profundidade em metros;

d = distância da vertical até a margem em metros.

As áreas próximas às margens não foram consideradas no cálculo, pois além de serem pequenas em relação à área total, as mesmas são compensadas pela extrapolação do retângulo formado pelo setor da meia seção (Figura 9). Assim, a vazão total do rio Guamirim foi calculada a partir da Equação 8:

$$Q = \sum_{i=1}^N V_i * A_i \quad (8)$$

Sendo,

Q = vazão total do rio em $m^3.s^{-1}$;

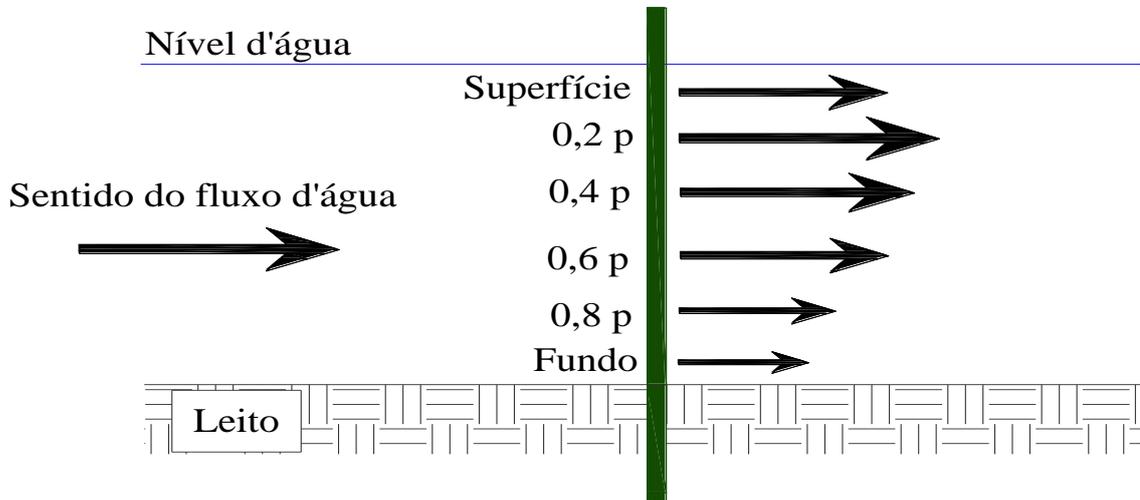
V_i = velocidade média da vertical i em $m.s^{-1}$;

Σ = somatório de todas as N sub-vazões (parciais)

A_i = área da sub-seção da vertical i em m^2 .

Durante as medições foi considerado que os vetores de velocidade das verticais, apresentam um comportamento não linear (Figura 10), sendo esta característica fundamental para o cálculo da média das velocidades na vertical.

Figura 10 - Vetores de velocidades da vertical representativo das medições de vazão realizadas no rio Guamirim



Fonte: O Autor.

A cada medida de descarga líquida, foi realizada uma leitura do nível de água do rio Guamirim, a partir da régua limnimétrica (Figura 11) instalada na seção, de modo a permitir a correlação entre o nível d'água do rio e a sua respectiva descarga líquida.

Figura 11- Régua Limnimétrica localizada no rio Guamirim, São Miguel do Oeste - SC. Localização : 248735E; 7040812N e 706m de altitude (UTM)



Fonte: O autor

4.5.1 Elaboração da curva-chave de vazões do rio Guamirim

As vazões foram medidas durante os eventos de chuva e foram relacionadas com sua respectiva cota limnimétrica (observada no mesmo momento de medição da vazão). Esta correlação é denominada de Curva-Chave de vazões e é de fundamental importância para os projetos de hidrologia fluvial.

A curva-chave de um curso de água é uma função que descreve a relação entre a vazão e a altura ou cota de escoamento. Neste estudo, foi considerada a altura do nível d'água do rio Guamirim medida por régua limnimétrica (Figura 11), levando em conta as características geométricas e hidráulicas da seção transversal do curso de água considerado (JACCON et al, 1989).

A curva-chave de um rio pode ser representada basicamente de três formas: Gráfica, Equação Matemática e Tabela de Calibragem (TUCCI, 2002).

Segundo o autor, na sua Forma Gráfica, a curva-chave apresenta os valores dos níveis ou cotas do rio (H) no eixo da ordenadas e as descargas (Q) no eixo das

abscissas. Isto se deve ao fato de se fazer uma alusão à régua que está locada no campo de maneira vertical.

Quando se utiliza a Equação Matemática, esta por sua vez, apresenta a descarga (Q) em função da cota (H). O que se tem observado é que se utilizam na maioria das vezes, duas formas de equações:

A forma polinomial, onde são mais utilizadas as formas quadráticas ou cúbicas (Equação 9):

$$Q = a_0 + a_1 * H + a_2 * H^2 + \dots + a_n * H^n \quad (9)$$

Sendo,

Q = descarga líquida em $m^3.s^{-1}$;

a_0, a_1, a_2, a_n e n = coeficientes de ajuste de cada curva-chave;

H = cota (m).

E a potencial (Equação 10):

$$Q = a * (H - H_0)^b \quad (10)$$

Sendo,

Q = descarga líquida em $m^3.s^{-1}$;

a e b = coeficientes de ajuste de cada curva-chave;

H = cota (m);

H_0 = cota (m) referente a descarga líquida nula.

O tipo de equação potencial é o mais difundido pela literatura (JACCON et al, 1989), porque se assemelha ao tipo de relação entre nível de água e a vazão encontrado em equações de escoamento em regime permanente e uniforme, como as fórmulas de Manning ou Chezy (em condições de canais de laboratório). Como a relação existente entre a lâmina d'água e a vazão depende fortemente das características da seção de escoamento, sobretudo da geometria da seção transversal, da declividade e da rugosidade, é normal que exista mais de uma equação para cada faixa de nível da seção de escoamento (JACCON et al, 1989). A Curva-Chave utilizada neste trabalho seguiu o modelo Potencial.

A representação dos resultados sob a forma de Tabela de Calibragem é feita por meio da extração dos valores da Curva de Calibragem ou através da aplicação direta da equação matemática da curva-chave, lembrado que poderá haver mais de uma equação (CHEVALLIER, 1991).

Com o emprego desta ferramenta, os custos com as medidas de descargas líquidas são minimizados, uma vez que é mais barato financeiramente efetuar leituras de nível do que de descargas líquidas. Para se gerar a função matemática representativa que possibilita a estimativa da descarga líquida por meio de medições de altura de lâmina d'água do rio Guamirim, foi ajustada seguindo o critério estatístico (Método dos Mínimos Quadrados), a fim de qualificar a equação (JACCON et al, 1989).

De acordo com Paiva et al. (2003), quando se gera a curva-chave, existem incertezas que estão associados a medida das vazões, principalmente na determinação da área e nas medidas das velocidades. Estes equívocos podem ser minimizados adotando-se um número maior de verticais para medição das velocidades do escoamento, gerando um desenho mais detalhado da seção de escoamento. Este critério foi utilizado na realização das medições de descargas líquidas do rio Guamirim.

4.5.2 Calibração da curva-chave

As medidas de descargas líquidas foram feitas durante o ano de 2016, entre os meses de maio e outubro, totalizando 70 observações efetuadas com molinete hidrométrico (Figura 12), seguindo a premissa estipulada por Jaccon et al (1989).

Durante o desenvolvimento da curva-chave do rio Guamirim foi tomado o cuidado para que a mesma tivesse o maior número de observações de vazões nas diversas faixas de variação de níveis para se conseguir um bom ajuste tanto em valores superiores, quanto para valores inferiores da curva de calibração do rio Guamirim, nesse sentido foram feitas medições de vazões na faixa de nível que variou de 0,21m até 2,25m. No entanto, Jaccon et al (1989) lembra que estas curvas precisam ser checadas periodicamente, devido as diferenças que podem ocorrer, como a deposição de sedimentos, que para uma mesma cota pode fornecer vazões diferentes.

Figura 12 - Medição de vazão efetuada no rio Guamirim com molinete hidrométrico no dia 18/05/2016



Fonte: O autor.

A equação ajustada selecionada para o cálculo das vazões do rio Guamirim foi a potencial. No procedimento de ajuste da Curva-chave foram determinados os valores dos parâmetros a , b e H_0 , da equação de modo que a equação ajustada se aproximasse ao máximo dos dados observados.

Para o ajuste da curva-chave foi utilizado o método de minimização de desvios entre os valores calculados pela equação e os valores observados, denominado método dos mínimos quadrados (MMQ).

Para isto, normalmente a equação potencial é linearizada por uma transformação logarítmica, resultando na Equação 11:

$$\ln Q = \ln[a * (H - H_0)^b] = \ln(a) + b * \ln(H - H_0) \quad (11)$$

Sendo,

Q = descarga líquida em $m^3 \cdot s^{-1}$;

H = nível da água em metros;

H_0 = nível da água para uma vazão nula em metros;

“a” e “b” = parâmetros de ajuste a ser calibrado pelo MMQ.

Inicialmente o valor de H_0 foi arbitrado a partir da regressão entre o logaritmo da vazão Q e as cotas (H- H_0).

A partir deste resultado, a regressão linear minimiza o somatório de desvios quadrados do logaritmo da vazão observada e do logaritmo da vazão calculada pela curva-chave para uma mesma cota:

$$\sum_{i=1}^N [\log(QE_i) - \log(QM)]^2 \quad (12)$$

Onde:

N = número de medições de vazão;

QM_i = valor medido de vazão na medição i em $m^3.s^{-1}$;

QE_i = valor estimado de vazão em $m^3.s^{-1}$, para a medição i, com base no nível da água medido na régua (H_i) em metros, durante a medida da descarga líquida.

Pelo MMQ, o valor do somatório da equação anterior é mínimo para o seguinte valor do coeficiente b:

$$b = N * \sum_{i=1}^N (X_i * Y_i) \quad (13)$$

Sendo,

$$X_i = \ln(H - H_0) \quad e \quad Y_i = \ln(Q_i) \quad (14)$$

O valor do parâmetro “a” é obtido pela aplicação da equação a seguir:

$$\ln(a) = \bar{X} - \bar{Y}.b \quad (15)$$

ou seja,

$$a = e^{(\bar{X} - \bar{Y}.b)} \quad (16)$$

Donde:

$$\bar{Y} = \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i)}{N} \quad \text{e} \quad \bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i)}{N} \quad (17)$$

O valor de H_0 é entendido como o valor do nível da água medido na régua, para o qual a descarga é nula ($Q=0$). Não existe uma forma ideal de encontrar o valor de H_0 . Neste trabalho foi adotado o método iterativo (tentativa e erro) para obter o H_0 , onde foram estipulados valores de H_0 até obter um resultado no qual a soma dos quadrados dos desvios fosse mínima.

Este tipo de ajuste feito com o Método dos Mínimos Quadrados, em geral apresentam resultados satisfatórios para a maioria dos locais onde as descargas do rio são monitoradas (JACCON et al, 1989).

Destaca-se, no entanto, que a qualidade do ajuste será tão maior, quanto melhor forem as condições hidráulicas da seção de escoamento definida (Posto Fluviométrico).

4.5.3 Monitoramento dos níveis d'água do rio Guamirim

O acompanhamento das variações do nível do rio Guamirim foi realizado utilizando um sensor automático de nível (Figura 13). Esse sensor foi ajustado para registrar os dados de nível de pressão na sonda com intervalo de 1 minuto em alguns eventos (início do monitoramento), porém com o andamento do estudo este tempo foi modificado para 5 minutos por questão de tempo de armazenamento de dados do sensor (memória interna). O sensor utilizado tem uma faixa de leitura de 0 a 30 metros de coluna d'água com resolução de leitura em intervalos de 1 milímetro (HOBO, modelo U20L).

Os dados brutos registrados pelo sensor foram corrigidos com base na pressão atmosférica local, obtida a partir dos dados da estação automática de superfície do INMET.

Figura 13 - Sensor de nível d'água (HOBO, modelo U20L) instalado no rio Guamirim, ao lado da régua linimétrica. Localização : 248735E; 7040812N e 706m de altitude

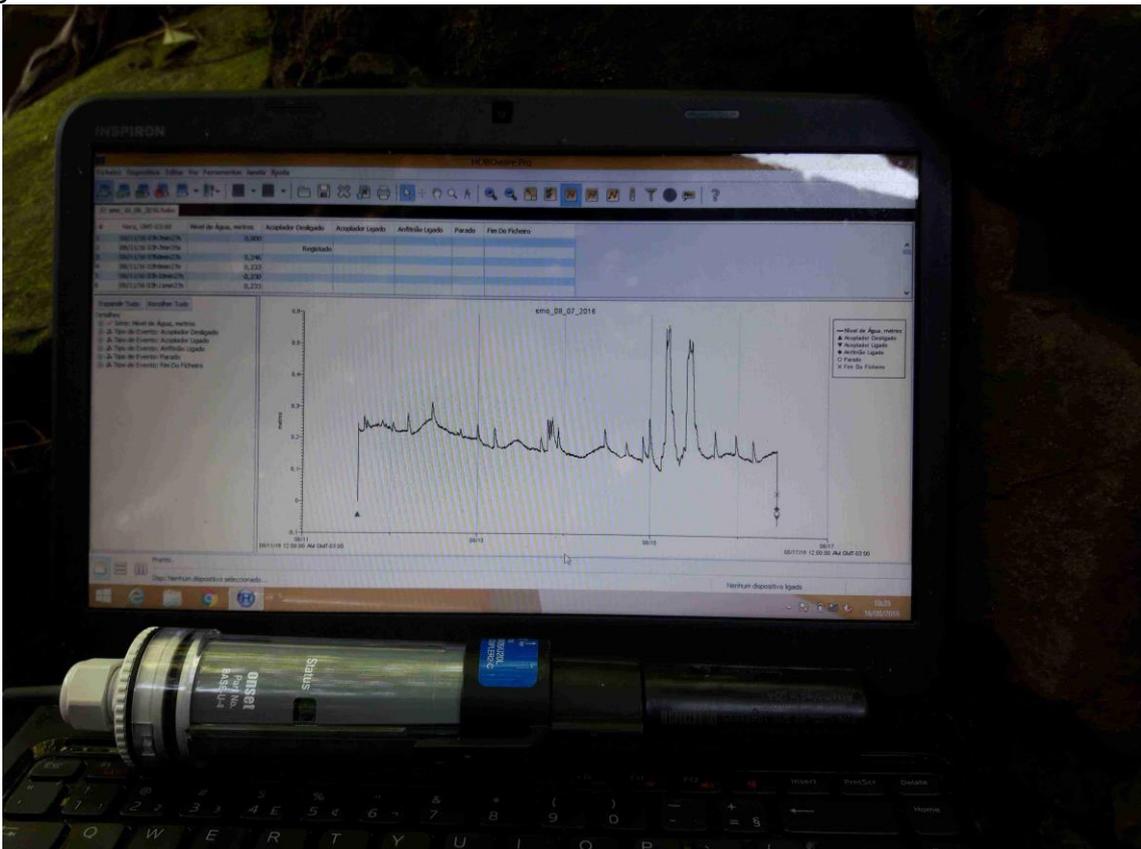


Fonte: O autor.

Com esta discretização temporal de cinco minutos o sensor teve capacidade para armazenar dados por até 15 dias. Após este período foram efetuadas várias coletas (downloads) destes dados (Figura 14) para posterior análise.

No momento da coleta dos dados dos níveis d'água do rio Guamirim foi conferida a diferença de nível entre a posição do sensor e a régua limnimétrica. Tal iniciativa era importante para manter a correlação, ou realizar ajustes, se necessário, entre nível e vazão.

Figura 14 - Coleta dos dados no dia 16/08/2016



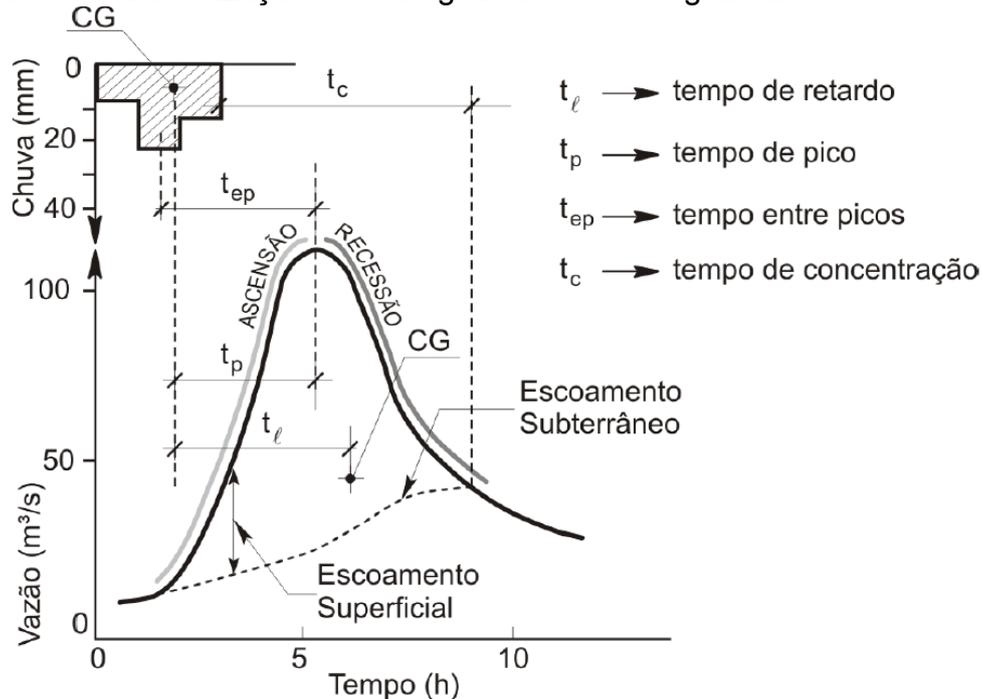
Fonte: O autor.

Os dados de pressão registrados pelo sensor foram corrigidos descontando o valor da pressão atmosférica (o interesse é apenas da coluna líquida). Também foi feita uma correlação entre a altura d'água calculada a partir da sonda e a medição obtida no momento da coleta com a régua limnimétrica para poder ajustar as informações. Foi realizado o monitoramento contínuo do nível d'água do rio Guamirim durante todo o período de monitoramento considerado neste estudo (05/2016 a 10/2016).

4.5.4 Cálculo dos volumes de água gerados pelos eventos de chuva (V)

O volume total de água gerado pelo evento de chuva foi calculado a partir do hidrograma gerado para cada evento. Entende-se o hidrograma como uma resposta da bacia a uma dada precipitação e tem forte relação com as características fisiográficas da bacia hidrográfica (Figura 15).

Figura 15 - Caracterização do Hidrograma e do Hietograma.



Fonte: adaptado de Tucci, 2002.

A estimativa do volume de água gerado pelo evento pode ser realizada a partir da separação do escoamento superficial do escoamento de base. O volume total é representado pela integração da área do hidrograma. Isto é facilmente entendido quando se observa as grandezas envolvidas:

No eixo das ordenadas têm-se a vazão ($L^3 \cdot T^{-1}$) e no eixo das abscissas têm-se o tempo (T). A área seria um produto de $Q \times t$, resultando no volume (L^3).

Outra forma de se determinar o volume escoado é através da relação entre precipitação e área da bacia, uma vez que o runoff (escoamento superficial) é conhecido (C).

Neste estudo foi utilizado os hidrogramas dos eventos monitorados para o cálculo dos volumes gerados pelas precipitações.

4.5.5 Estimativa das vazões de pico dos eventos (Q_p)

Quando não foi possível medir a vazão máxima com o molinete fluviométrico em função de velocidades elevadas e do elevado nível da água o que caracteriza uma situação de risco, a vazão de pico foi estimada a partir da Curva-Chave de vazões (item 4.5.2).

A vazão máxima foi calculada por substituição de dados de nível de água obtidos pelo sensor automático (item 4.5.3) na equação calibrada para a seção hidrossedimentológica. As demais vazões para confecção do hidrograma foram calculadas a partir da Curva-Chave de vazões considerando os valores registrados de nível d'água pelo sensor de nível.

4.6 CONCENTRAÇÃO E DESCARGA SÓLIDA DE SEDIMENTOS EM SUSPENSÃO

Para a coleta das amostras de sedimentos em suspensão, foi utilizado o amostrador por integração na vertical USDH-48 (Figura 16). Esse amostrador tem seu funcionamento baseado na integração da amostra em cada vertical da seção transversal de escoamento, visto que acumula em um recipiente a mistura água + sedimentos durante certo tempo a partir de um pequeno bocal.

Figura 16 - Amostrador USDH-48 para integração na vertical utilizado para coleta de sedimento em suspensão no rio Guamirim (período de maio a outubro de 2016)



Fonte: O autor

O equipamento USDH-48 admite a amostra enquanto é movido em

velocidade de trânsito uniforme na vertical do curso d'água. Trata-se em um equipamento leve e recomendado para pequenas profundidades (até 1,5 m) para medidas à vau.

As amostragens de sedimentos em suspensão foram realizadas simultaneamente com as medidas das descargas líquidas (vazões), uma vez que foi utilizado o método de Igual Incremento de largura (IIL) de acordo com metodologia indicada por Carvalho (2008). Esta técnica é associada ao método de igual velocidade de trânsito em todas as verticais, conhecido como ETR (*equal transit rate*).

Em cada evento de chuva foi realizada uma amostragem de sedimentos em suspensão para cada nível d'água do rio ao longo da duração do evento de subida e descida o hidrograma. Foram efetuadas amostragens durante a subida, no pico e durante a descida do nível d'água do rio Guamirim (hidrograma), de modo a permitir a quantificação das concentrações de sedimentos em suspensão, bem como as descargas sólidas de sedimentos em suspensão.

4.6.1 Determinação da concentração de sedimentos em suspensão (CSS)

Para a quantificação das concentrações de sedimentos em suspensão (CSS) foram utilizados dois métodos: Filtração e/ou Evaporação.

O critério de escolha do método de determinação da CSS foi função da concentração de sedimentos na amostra, conforme indica Carvalho (2008). Quando as amostras apresentavam baixa CSS, optou-se pelo método da filtração. Para amostras com elevada CSS, o método da evaporação é o que foi utilizado. A razão de se utilizar o método da evaporação para a maioria das amostras foi o fato de que as mesmas apresentavam elevada CSS e que causa o entupimento dos filtros.

Quando a CSS foi determinada a partir do método da evaporação, foram medidos os Sólidos Dissolvidos (SD). Após 24h de repouso, 50ml de cada amostra foi extraída da parte superior da garrafa e colocadas em um béquer para a determinação dos SD. A transferência deste volume para o béquer foi realizada usando uma pipeta volumétrica (Figura 17), manuseada com cuidado para evitar que o sedimento do fundo da garrafa entrasse em suspensão novamente.

Em laboratório foram anotadas todas as informações necessárias para o cálculo das CSS (ver APÊNDICE 2).

Figura 17 - Pipetagem para determinação de sólidos em suspensão realizadas em amostras de sedimentos coletados no rio Guamirim em 15/07/2016. Laboratório de mecânica dos Solos da Universidade do Oeste de Santa Catarina – UNOESC



Fonte: O autor.

O restante da amostra presente na garrafa foi transferido para um segundo béquer, após a agitação das mesmas para garantir que o sedimento decantado se solte do fundo da garrafa.

Ainda durante a transferência das amostras, foi feita a raspagem das paredes internas das garrafas com bastão de vidro para desprender o material aderido a parede e posterior lavagem com água destilada, retirando todo o resíduo de sedimentos das garrafas.

Cada amostra (béquer com SD e béquer com CSS) foi levada para a estufa a 105°C durante 24h (Figura 18).

Figura 18 - Amostras de sedimentos coletados em 18/09/2016 no rio Guamirim na estufa de evaporação (105°C / 24h) do laboratório de Saneamento da Universidade do Oeste de Santa Catarina (UNOESC)



Fonte: O Autor.

Após esta etapa os béqueres foram resfriados em um dessecador com sílica até as amostras atingirem a temperatura ambiente e em seguida as amostras foram pesadas em balança analítica com precisão de 4 casas decimais.

As amostras com baixa CSS que foram submetidas ao método da filtração passaram pelas seguintes etapas:

Após a pesagem das amostras vindas do campo, o material foi filtrado em cadinhos de Gooch, sendo que o resíduo da filtragem foi levado a estufa por cerca de 1 hora a 100°C, para evitar a queima de minerais. O procedimento de determinação de SD e da CSS segue o mesmo roteiro descrito no método da evaporação, culminando com a pesagem das amostras secas em balança analítica.

4.6.2 Descarga sólida de sedimentos em suspensão (qss)

Normalmente a qss é expressa em termos de transporte de massa sólida durante um determinado tempo e suas unidades de medida são usualmente g.s^{-1} ou ton.dia^{-1} . Quando se realiza a amostragem de sedimentos transportados por arrasto, os amostradores específicos para esta finalidade são posicionados na seção transversal e deixados nesta posição durante um determinado período. Desta forma a descarga sólida é medida de forma direta. Entretanto, como este trabalho tratou unicamente dos sedimentos em suspensão, foram realizadas amostragens da concentração de sedimentos com o equipamento USDH-48 (Figura 19) e, após as coletas e análises laboratoriais de CSS a DSS foi estimada com base na Equação 18.

$$qss = CSS.Q.0,0864 \quad (18)$$

Sendo:

qss = descarga sólida em suspensão (Mg.d^{-1}),

CSS = concentração de sedimentos em suspensão (g.m^{-3} ou mg.L^{-1}),

Q = vazão do rio ($\text{m}^3.\text{s}^{-1}$)

0,0864 = fator de transformação de g.s^{-1} em Mg.d^{-1} .

Desta forma, a determinação da qss depende de duas variáveis fundamentais: a CSS (item 4.6.1) e Q (item 4.5).

Figura 19 - Amostragem de sedimentos em suspensão com USDH-48 no rio Guamirim em 17/10/2016



Fonte: O autor.

Em algumas situações não foi possível amostrar sedimentos com o USDH-48 devido à elevada velocidade de subida e/ou descida do hidrograma. Isto impossibilitou o cálculo dos tempos de integração na vertical, nestes casos foram coletadas amostras pontuais.

Para a análise e interpretação dos resultados foi elaborada a curva-chave de sedimentos visto que é uma importante ferramenta para obtenção de informações referentes a variação da DSS em função da vazão do rio. Essa curva foi elaborada correlacionando as DSS com sua respectiva vazão num gráfico em espaço logarítimo.

É um método muito simples e limitado, já que indica que a DSS é função apenas da vazão, o que não é verdade (depende de vários aspectos fisiográficos e climáticos da bacia), mas é útil para analisar as variações das produções de sedimentos no tempo.

4.7 DADOS DE ENTRADA NA EQUAÇÃO UNIVERSAL DE PERDAS DE SOLOS MODIFICADA (MUSLE)

Embora originalmente desenvolvida para aplicação em pequenas áreas, a Equação Universal de Perda de Solos (Universal Soil Loss Equation – USLE) desenvolvida por Wischmeier & Smith (1978) é amplamente utilizada para avaliação qualitativa de predição de perdas de solos por erosão laminar em grandes áreas, com o objetivo de se avaliar e identificar áreas susceptíveis à erosão, de forma rápida e econômica, visando o planejamento ambiental (FARINASSO et al., 2006).

É uma das fórmulas mais utilizadas para estimativa da erosão em longos períodos (normalmente médias anuais), sendo deduzida a partir de uma base de dados em mais de 10000 parcelas com dimensões padrão, porém nos mais diferentes tipos de clima, solo, relevo e cultivos. Devido ao fato das dimensões serem reduzidas, têm-se um efeito de escala que limita as informações geradas a estimar os processos de erosão hídrica superficial em entressulco.

Trata-se de um modelo de base empírica que consiste em calcular a erosão do solo por meio de índices que representam os principais fatores, como erodibilidade, topografia, precipitação, uso do solo. Para utilização em bacias (áreas maiores) e durante os eventos de chuva, a USLE é modificada em MUSLE, sendo assim expressa (Equação 19):

$$PS = a(Q_p * V)^b K.L.S.C.P \quad (19)$$

Sendo:

PS = perda de solo por área no tempo (Mg),

V = volume de água gerado por um evento de chuva (m³);

Q_p = vazão de pico gerado por um evento de chuva (m³.s⁻¹);

“a” e “b” = parâmetros calibrados para cada bacia. No caso da MUSLE clássica os mesmos valem 0,0009 e 0,56, respectivamente;

K = fator de erodibilidade do solo (t.h.MJ⁻¹.mm⁻¹);

LS = fator conjunto de comprimento de rampa e grau de declividade (adimensional);

C = fator uso e manejo (adimensional), e

P = fator de prática conservacionista (adimensional).

Conforme descrição feita em tópicos anteriores deste trabalho, a MUSLE apresenta uma série de fatores que são de fundamental importância para a sua determinação de maneira adequada para que se tenha bons resultados nos modelos hidrológicos. A seguir estão listados a metodologia de obtenção dos dados de entrada da MUSLE para este estudo.

4.7.1 Fator K

A erodibilidade do solo está diretamente relacionada ao tipo de solo presente na região, uma vez que suas propriedades texturais e estruturais influenciam na interação com a chuva e na sua capacidade de infiltração (MELLO, 2003).

Desta forma, constata-se que alguns tipos de solo erodem mais facilmente do que outros, pela sua instabilidade estrutural, que influencia na permeabilidade, capacidade armazenamento de água e na velocidade de infiltração (FARINASSO et al, 2006).

Sendo assim, determinação do fator K, além de seu alto custo, demanda tempo, até que sejam obtidos os valores definitivos sobre as unidades específicas dos solos.

O fator (K) de Erodibilidade do solo expressa a suscetibilidade do solo em ser erodido e é dado pelas características intrínsecas do mesmo. Uma das formas para determinação deste fator é o nomograma de Wischemeier & Smith (1978), construído a partir da Equação 20:

$$K = \frac{2,1 * M^{1,4} * 0,0001 * (12 - a) + 3,25 * (b - 2) + 2,25 * (c + 3)}{100} \quad (20)$$

Sendo:

M = textura do solo

K = índice de erodibilidade do solo;

a = percentual de matéria orgânica;

b = índice para estrutura do solo (b = 1 p/ estrutura granular muito fina; b = 2 para estrutura granular fina; b = 3 para estrutura granular, média ou grossa; b = 4 para estrutura em blocos, laminar ou massiva);

c índice para classe de permeabilidade do solo (c = 1 para permeabilidade rápida; c = 2 para permeabilidade moderada a rápida; c = 3 para permeabilidade moderada; c = 4 para permeabilidade lenta a moderada; c = 5 para permeabilidade lenta; c = 6 para permeabilidade muito lenta) e;

M representa a textura do solo.

O parâmetro M pode ser calculado a partir da Equação 21:

$$M = (\% \text{silte} + (\% \text{areia}_{\text{ fina}}) * (100 - \% \text{argila}) \quad (21)$$

Como a área da bacia é relativamente pequena foi encontrado um único tipo de solo, sendo caracterizado como Cambissolo.

Com base nesta informação, recorreu-se a literatura para verificar os estudos de análise física do solo e que foram necessários para a estimativa do fator erodibilidade.

4.7.2 Fator LS

O fator LS é o fator entre o ângulo de inclinação do terreno e a declividade (ângulo de inclinação do terreno) com o comprimento de rampa. Terrenos íngremes são mais propícios à erosão por favorecer o aumento da velocidade do escoamento superficial.

Para estimativa deste fator, foram utilizados os dados do levantamento aerofotogramétrico contratado pelo Estado de Santa Catarina, estando disponíveis na prefeitura municipal de São Miguel do Oeste - SC.

O levantamento contém o modelo numérico do terreno (MNT) com resolução espacial de 1m. A partir do MNT e com auxílio de um software de geoprocessamento, foram gerados os mapas de declividades e de comprimento de encostas.

Entre diversos métodos para a determinação do fator topográfico e do comprimento de rampa "LS" (MOORE et al, 1986; DESMET et al, 1996), neste estudo, foi utilizado o método indicado por Burrough & McDonnell (1998), como mostrado na Equação 22:

$$LS = 2,5 \sqrt{\frac{VB}{22,13}} \times 0,769 \sqrt{\frac{\text{sen } \theta}{0,0896}} \quad (22)$$

Sendo:

LS = fator topográfico adimensional;

VB = acumulação de fluxo multiplicada pelo tamanho da célula;

θ = ângulo da declividade em graus.

O mapa de acumulação de fluxo e o mapa de declividades foram elaborados por intermédio de ferramenta de geoprocessamento (*ArcGIS*), com base no MNT (Modelo Numérico do Terreno).

4.7.3 Fatores C e P

Os valores de C para cada uso/ocupação foram obtidos a partir dos estudos de Farinasso et al. (2006) e Stein et al (1987), sendo apresentados no Quadro 1.

Quadro1: Valores de referência utilizados na MUSLE aplicados na bacia do rio Guamirim

Uso/Ocupação	Fator C	Fonte
Águas e áreas úmidas (brejos)	0	Farinasso et al, 2006
Urbana (incluindo asfalto)	0,001	Farinasso et al, 2007
Solo exposto	1	Farinasso et al, 2008
Vegetação rasteira	0,042	Farinasso et al, 2009
Cultivos diversos	0,018	Farinasso et al, 2010
Vegetação arbórea (todos os portes)	0,00004	Stein et al, 1987

Fonte: O autor.

O fator C é a relação de comparação entre um terreno descoberto em relação a um terreno cultivado, sendo diretamente pelo tipo de cultura e pelo manejo do solo.

O fator P é a relação entre intensidade esperada de perda de solo em local com práticas conservacionistas, com a perda de solo em local de declive, considerando que um local sem cobertura vegetal é mais favorável à erosão (FARINASSO et al, 2006). Quando o valor de P é igual a unidade, significa que o plantio é feito no sentido da declividade do terreno sem respeitar as curvas de nível (CHAVES, 1994),

ou em tratando-se de áreas urbanas, o valor de $P = 1$ indica área extremamente impermeável. A interpretação conjunta desses fatores visa avaliar a influência antrópica no processo de perda de solos.

A estimativa dos fatores P e C foram realizadas a partir da imagem aérea fornecida pela prefeitura municipal de São Miguel do Oeste - SC, na escala 1:10000. Esta imagem foi transformada em um modelo matricial com resolução de 39 cm cada pixel. Estes dados compõem também o pacote do aerolevanteamento contratado pelo Estado de Santa Catarina no ano de 2013 (Secretaria do Desenvolvimento Social do Estado de Santa Catarina, 2016).

4.7.3 Avaliação do desempenho da MUSLE

Para a análise de eficiência da equação testada (MUSLE), os dados das produções de sedimentos observadas (item 4.6.2) foram confrontados com os valores calculados pela MUSLE tradicional e com a MUSLE ajustada (calibrada) para a microbacia. Como análise preliminar do desempenho da MUSLE foi utilizado o coeficiente de determinação de Pearson (R^2).

Machado & Vettorazzi (2003) indicam que um dos mais importantes critérios estatísticos para avaliar o ajuste de modelos hidrológicos é o Coeficiente de Eficiência de Nash e Sutcliffe (COE), calculado por meio da Equação 23

$$COE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (PS_{OBS} - PS_{calc})^2}{\sum_{i=1}^n (PS_{OBS} - PS_{médio_calc})^2} \quad (23)$$

em que:

COE = coeficiente de eficiência, variando do infinito negativo até o valor da unidade em termos percentuais.

PS_{OBS} = produção de sedimentos observada em campo em kg;

PS_{calc} = produção de sedimentos calculada pela MUSLE em kg; e

$PS_{médio_calc}$ = média das produções de sedimentos calculadas pela MUSLE em kg.

Neste trabalho foi realizado também uma análise estatística de erro médio quadrático (EMQ), tanto para a MUSLE tradicional, quanto para a ajustada,

conforme Equação 24.

$$EMQ = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (PS_{OBS} - PS_{calc})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (PS_{OBS} - PS_{médio_calc})^2}} * 100 \quad (24)$$

Em que:

EMQ = erro médio quadrático em termos percentuais;

PS_{OBS} = produção de sedimentos observada em campo em kg;

PS_{calc} = produção de sedimentos calculada pela MUSLE clássica em kg, e

$PS_{médio_calc}$ = média das produções de sedimentos calculadas pela MUSLE clássica e/ou ajustada em kg.

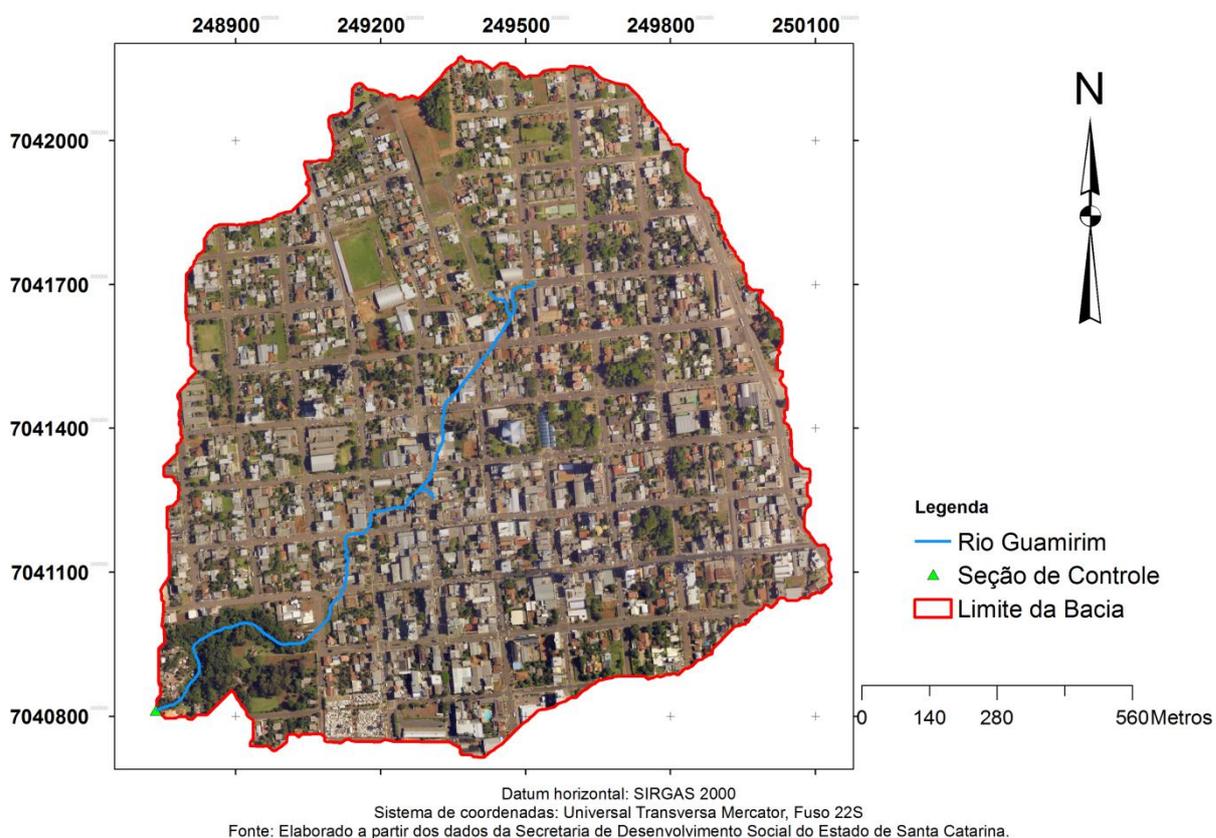
A mesma equação de Erro Médio Quadrático foi utilizada para avaliar os resultados da MUSLE Ajustada.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CARACTERÍSTICAS FISIAGRÁFICAS DA BACIA HIDROGRÁFICA

A delimitação da bacia hidrográfica foi realizada com auxílio de software de geoprocessamento (Figura 20), totalizando uma área de 1,49 km². Após a delimitação, foram extraídas as drenagens (cursos d'água) e efetuada uma conferência em campo para verificação da existência ou não destes cursos d'água. Todos os dados de entrada utilizados neste trabalho (referentes ao modelo numérico do terreno e ortofoto) tiveram o datum alterado para SIRGAS 2000, uma vez que este é o datum planimétrico oficial do Brasil.

Figura 20 - Bacia hidrográfica do rio Guamirim, São Miguel do Oeste - SC

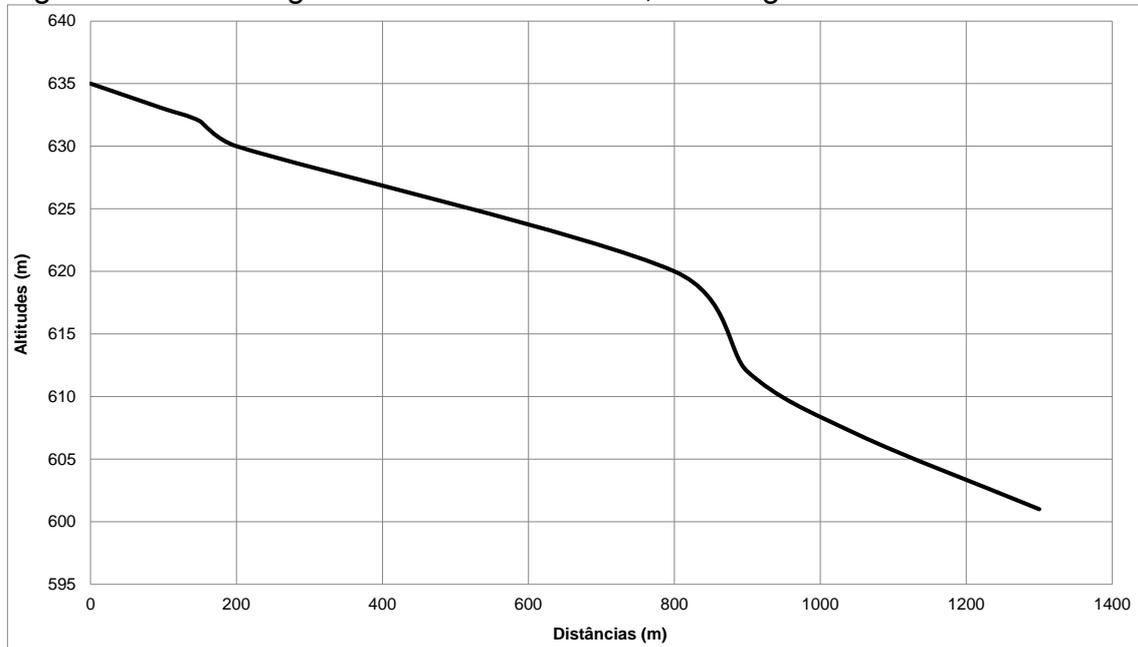


Fonte: O autor

Devido a característica urbana da microbacia, alguns cursos d'água indicado pela análise computacional não foram encontrados a campo e isso deve ao fato de muitos deles estarem canalizados. A Figura 21 apresenta de forma esquemática o perfil longitudinal do rio Guamirim, considerando apenas a drenagem que foi

gerada pela análise de geoprocessamento. Observa-se que este curso d'água apresenta uma declividade média de aproximadamente 2,5%, uma vez que a amplitude das altitudes é de 34 m, distribuída numa extensão de cerca de 1,3 km.

Figura 21- Perfil longitudinal do rio Guamirim, São Miguel do Oeste - SC

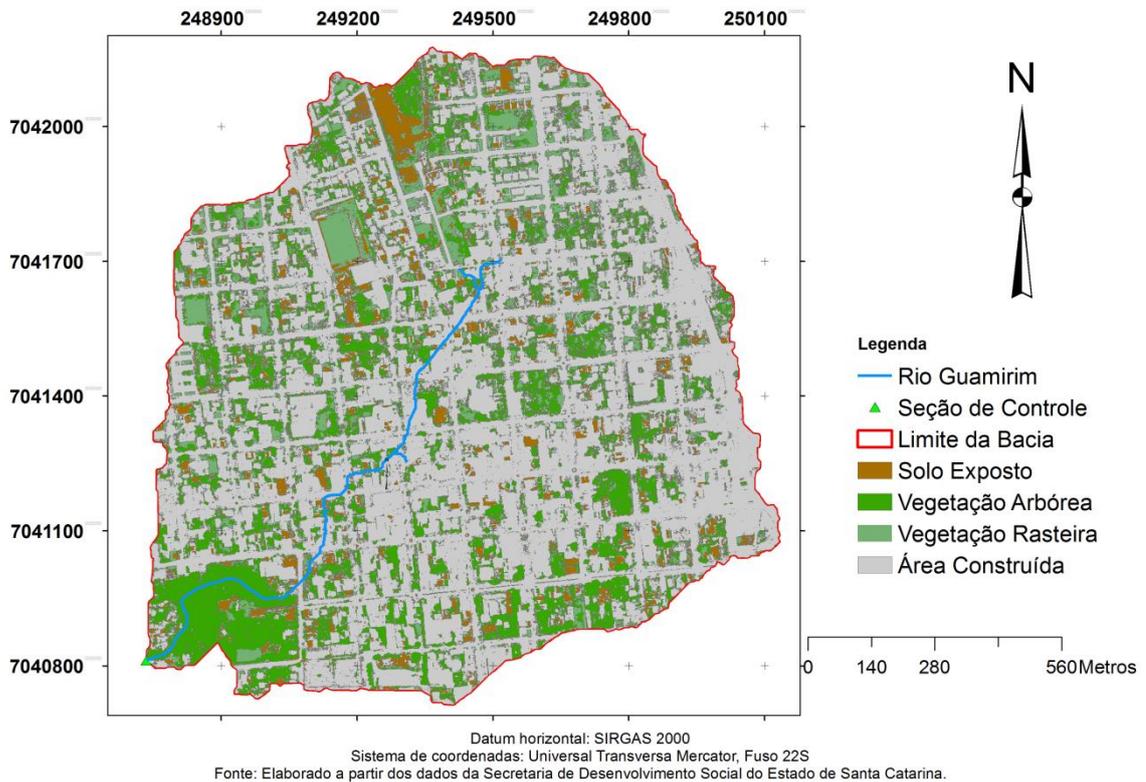


Fonte: O autor.

O trecho mais declivoso deste curso d'água está situado na sua porção central, cuja magnitude é da ordem de 7%. A partir destes valores é possível constatar que o rio Guamirim se classifica com declividades moderadas. As declividades de uma bacia hidrográfica são informações importantes, já que as velocidades de fluxos são diretamente influenciadas pelas mesmas.

Em relação ao uso e ocupação do solo, a bacia do rio Guamirim (Figura 22) apresenta como classes principais de usos do solo, áreas construídas 64,46%, a vegetação rasteira 8,02%, a vegetação arbórea 21,22% e 6,3% de solo exposto.

Figura 22 – Classificação de uso e ocupação do solo urbano da bacia hidrográfica do rio Guamirim em São Miguel do Oeste - SC



Fonte: O autor.

A partir da análise da classificação de imagem da microbacia do rio Guamirim, foram destacadas as seguintes classes: Solo exposto, vegetação rasteira, vegetação arbórea e áreas construídas. Na Tabela 3 pode ser verificada a distribuição relativa à área total de estudo.

Nesta mesma tabela foram incluídos os fatores de usos do solo demais fatores utilizados na MUSLE Para o fator P foi utilizado como referência os valores indicados pelo mesmo autor apresentado no Quadro 1 (FARINASSO, 2006).

Para a estimativa do parâmetro erodibilidade (K) foi feita uma revisão sobre em artigos de diversos autores que pesquisaram este fator no tipo de solo presente nesta microbacia em estudo (Cambissolo). Ao final uma média entre os valores encontrados por estes autores foi utilizado para o cálculo da MUSLE. O valor médio adotado foi de $0,0355 \text{ Mg.h.MJ}^{-1}.\text{mm}^{-1}$ (Tabela 3).

Tabela 3 - Distribuição relativas das classes de uso e ocupação do solo e fatores de uso manejo e conservação dos solos da bacia hidrográfica do rio Guamirim

Uso do solo	Área (km²)	Área (%)	C	P	K
Solo exposto	0.09	6.30	1	1	0.0355
Vegetação rasteira	0.12	8.02	0.042	0.01	0.0355
Vegetação arbórea	0.32	21.22	0.00004	0.005	0.0355
Área construída	0.96	64.46	0.001	0.03	0.0355
Total	1.49	100.00			

Fonte: O autor.

5.2 TEMPO DE CONCENTRAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA

A quantificação do tempo de concentração da bacia foi realizada a partir dos hidrogramas e dos hietogramas dos eventos de chuvas monitorados. De acordo com Silveira (2005) a avaliação do tempo de concentração das bacias hidrográficas pode ser realizado a partir da utilização dessas duas ferramentas, destacando que os resultados refletem as características fisiográficas das mesmas.

A utilização de equações empíricas para determinação do tempo de concentração apresenta imprecisão devido às condições limitantes de desenvolvimento destas equações. Neste trabalho foi considerada para o cálculo do tempo de concentração da bacia a média dos doze eventos medidos (de maio de 2016 a outubro de 2017).

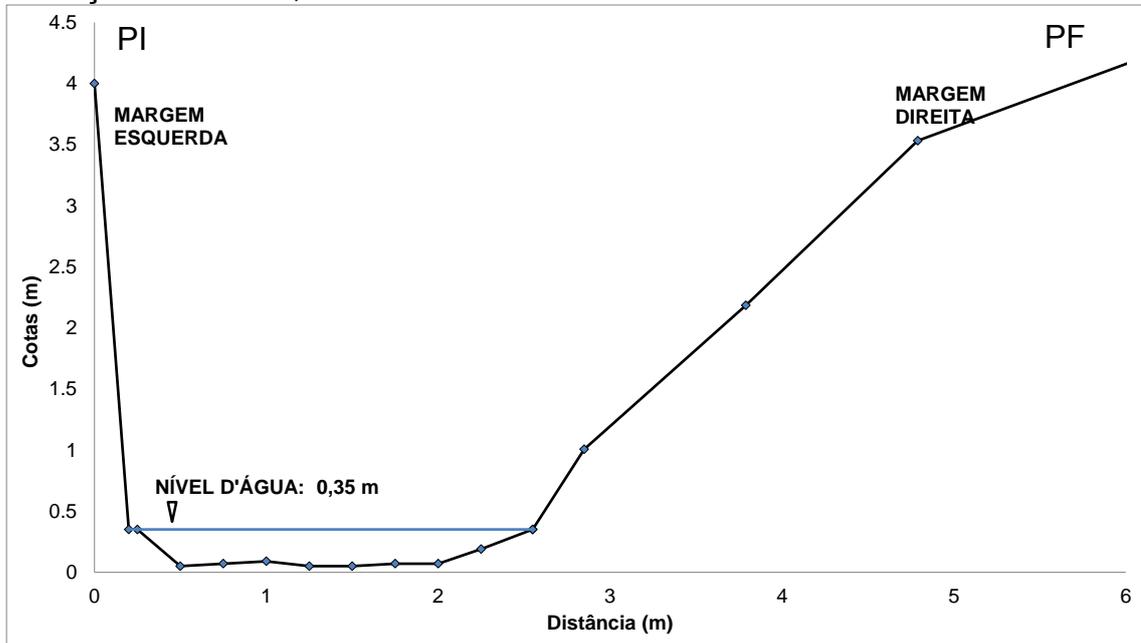
No cálculo foi avaliado o tempo de finalização das chuvas e o tempo de inflexão dos hidrogramas (mudança de tendência) das curvas de recessão do hidrogramas, conforme comentado da Figura 15. Em média o tempo de concentração da bacia apresentou uma variação de 25 minutos e 35 minutos. Esta variabilidade pode se resultante das condições de umidade do solo na antecedência das chuvas e muito pela intensidade das mesmas.

5.3 SEÇÃO TRANSVERSAL DO RIO GUAMIRIM NO LOCAL DE MONITORAMENTO

A análise geométrica (forma) da seção transversal é fundamental para uma boa correlação entre nível d'água e descarga líquida. Para Jaccon e Cudo (1989) a avaliação da seção de escoamento permite inferir a qualidade de ajuste do modelo da curva de descarga e também verificar uma possível mudança de forma devido ao

processo de erosão de canal. A Figura 23 apresenta de forma esquemática a seção transversal de escoamento.

Figura 23 - Perfil transversal da seção de monitoramento do rio Guamirim. Localização : 248735E; 7040812N



Fonte: O autor.

Jaccon e Cudo (1989) comentam que a importância de uma seção transversal apresentar pouca variabilidade (forma regular), está em permitir a extrapolação superior da curva-chave. Esta extrapolação, apesar de não ser recomendada, é útil para situações em que se considera arriscado ou inviável entrar no curso d'água para realizar as medições de vazões (como no caso de cheias).

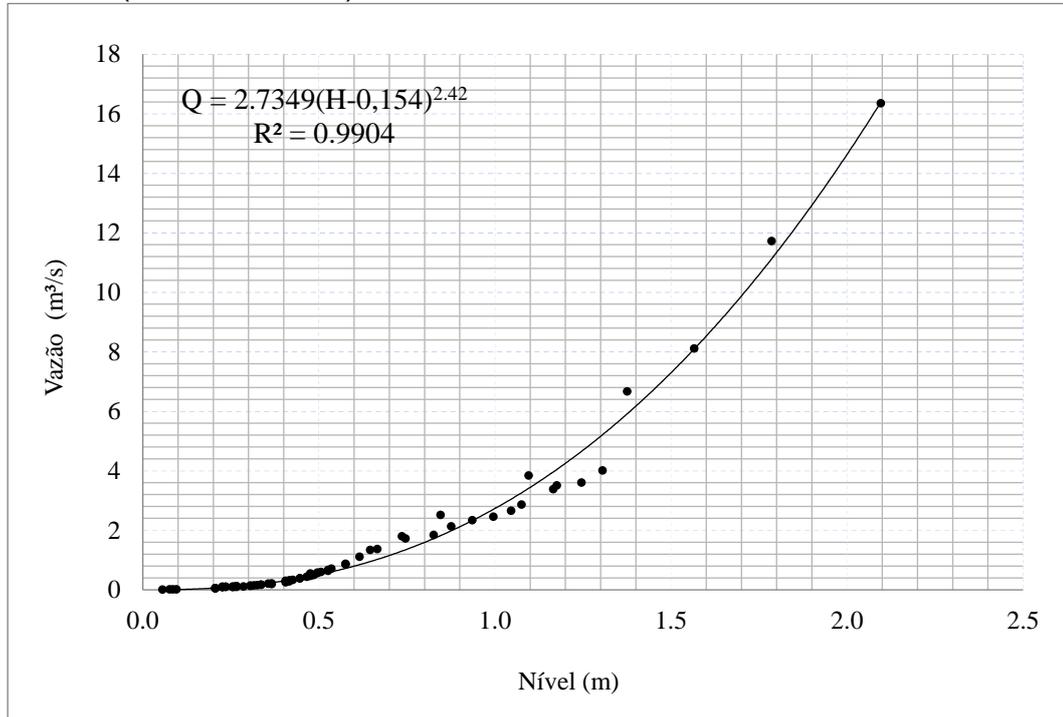
Observa-se na Figura 23 que a seção escolhida para o estudo, apresenta uma boa geometria, ou seja, se aproximando de uma forma trapezoidal. Os canais trapezoidais tendem a ter um melhor raio hidráulico (uma relação entre área e perímetro molhado), favorecendo o escoamento e a relação nível-vazão.

5.4 DESCARGAS LÍQUIDAS

A análise das descargas líquidas foi realizada a partir do ajuste da curva-chave de descarga líquida pelo método dos mínimos quadrados (MMQ). A Figura 24 apresenta a relação entre nível d'água e vazão do rio Guamirim, sendo construída a partir de um conjunto amostral de 70 valores observados de vazões e níveis d'água

medidos simultaneamente, ao longo do ano de 2016.

Figura 24- Curva-chave de descarga líquida do rio Guamirim medidos ao longo do ano de 2016 (maio a outubro)



Fonte: O autor.

A curva-chave do rio Guamirim (porção urbana) apresentou um excelente ajuste (99%), conforme pode ser observado pelo coeficiente de determinação de Pearson (R^2) apresentado na Figura 24. Observa-se uma boa distribuição dos pontos em torno da linha de tendência potencial ajustada ao modelo.

O ajuste do H_0 da curva-chave (nível d'água para uma vazão tendendo a nula) estimou um valor de 0,154 m, conforme a equação exibida na Figura 24. Para um bom ajuste desta curva, foi necessário realizar medições numa ampla faixa de níveis d'água, contemplando valores de vazões muito baixas (limitador do H_0) até valores de vazões máximas. Nesse sentido, foram medidos intervalos de níveis d'água de 0,21 m a 2,25 m e intervalo de descargas líquidas entre $0,0041 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ a $16,36 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Entretanto vale salientar que para este nível máximo, a incerteza foi maior em virtude da dificuldade e do risco da medida de vazão neste evento. Esta vazão foi determinada a partir das medidas de velocidades na superfície do rio, pois estas velocidades eram extremamente altas.

A curva-chave é uma das ferramentas fundamentais para o desenvolvimento de trabalhos dentro de cursos d'água, já que basicamente a descarga líquida é um

dos principais aspectos quantitativos dos recursos hídricos. Os hidrogramas utilizados para o desenvolvimento deste estudo foram elaborados a partir da curva-chave. A curva-chave de descarga líquida também foi utilizada para estimar as vazões durante as ondas de cheia do rio Guamirim, durante a coleta das amostras de sedimentos em suspensão. Estas vazões são importantes para estimar a produção de sedimentos medida em campo (produto da vazão pela concentração de sedimentos em suspensão).

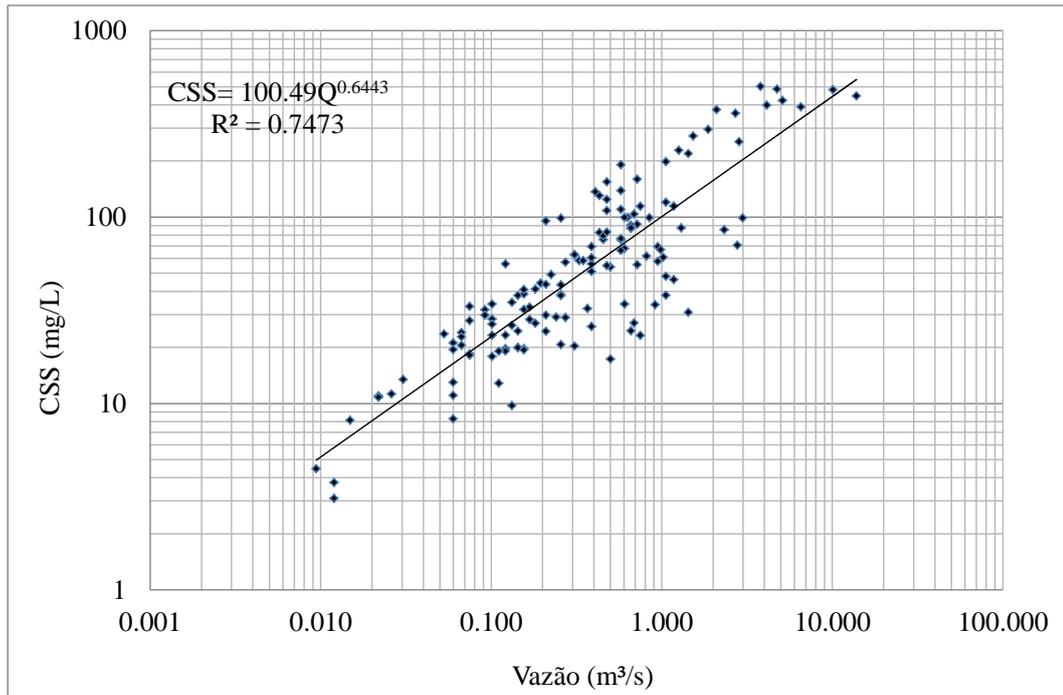
5.5 ANÁLISE DE DESCARGA DE SEDIMENTOS

A curva-chave de sedimentos é uma correlação simples entre concentração de sedimentos em suspensão (CSS) e descarga líquida (Q) e que conforme Horowitz et al (2014) deve ser representada numa escala logarítmica, uma vez que fenômenos naturais (intraevento) não seguem uma distribuição normal. A outra razão para a apresentação desta relação é que o logaritmo deforma a escala dos eixos de valores, possibilitando a ampliação de valores pequenos e reduzindo o espaço entre a representação de valores mínimos e máximos, facilitando a visualização da distribuição gráfica.

Conforme Merten et al (2014), quando a curva-chave de sedimentos apresenta um coeficiente de determinação de Pearson acima de 0,7, o modelo é considerado aceitável. Estes valores de R^2 são encontrados com certa frequência nas bacias brasileiras.

Entretanto, esta curva deve ser utilizada com cuidado e sempre levando em conta o fato de que ela relaciona a CSS apenas com as descargas líquidas do rio. Visto que a produção de sedimentos depende, também de outros fatores como: relevo, intensidade da chuva, uso e ocupação do solo, e tipo de solo. Sendo assim, é natural que a correlação entre CSS e Q não seja elevada (valor elevado de R^2). A variação da CSS observada nos eventos monitorados variaram de $3,1 \text{ mg.L}^{-1}$ até 501 mg.L^{-1} , conforme Figura 25.

Figura 25 - Curva-chave de sedimentos coletados no rio Guamirim entre no período de maio de 2016 a outubro de 2016



Fonte: O autor.

Na Figura 25 observa-se que a menor concentração de sedimentos em suspensão foi de $3,1 \text{ mg.L}^{-1}$, a máxima concentração foi de $501,34 \text{ mg.L}^{-1}$ e concentração média de $84,02 \text{ mg.L}^{-1}$.

Ainda na Figura 25 observa-se que a maior parte das amostras estão distribuídas entre 20 mg.L^{-1} e 100 mg.L^{-1} , correspondendo às vazões de $0,03 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ a $1 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, respectivamente. Isso corresponde a cerca de 62% de todas as amostras coletadas ao longo dos doze eventos.

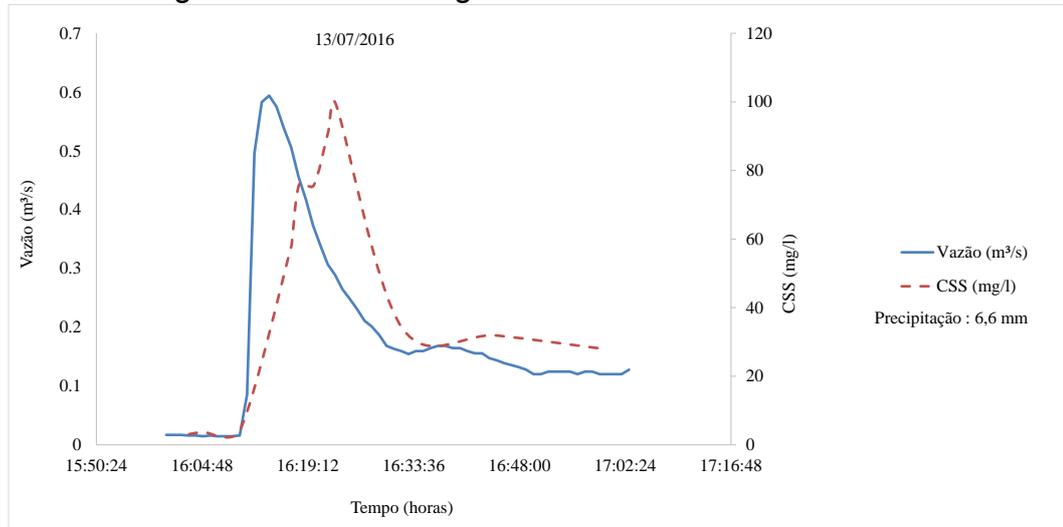
Visando um bom ajuste da curva-chave de sedimentos, as amostragens devem abranger uma ampla faixa de vazões, uma vez que quando mais valores observados se obtiverem, mais os erros tendem a serem diluídos na média. Estes tipos de relações não levam em consideração o efeito de atraso ou adiantamento do transporte de sedimentos ao longo da bacia e ao longo do curso d'água.

A histerese de fenômenos hidrossedimentológicos representa um atraso de um fenômeno em relação a outro (MINELLA, 2011). Foram separados dois hidrogramas entre os 12 gerados para representar a relação de atraso entre a vazão e a concentração de sedimentos em suspensão, conforme Figura 26 e Figura 27.

Na Figura 26 observa-se que o pico da vazão não coincidiu com o tempo da máxima concentração de sedimentos em suspensão. Neste caso, a vazão máxima

antecipou o pico da concentração de sedimentos de 13 minutos.

Figura 26 - Hidrograma e Sedimentogramas do 2º evento observado em 13/07/2016



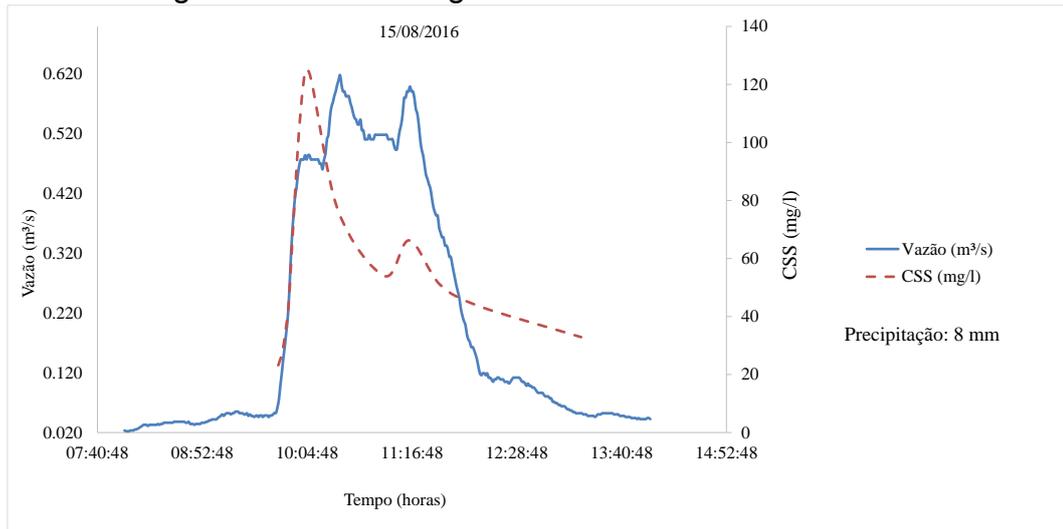
Fonte: O autor.

Lefrançois et al.(2007) observam que este aspecto é complexo e muito difícil de interpretar já que a dinâmica dos sedimentos é governada por variabilidade espacial e temporal. Esta variabilidade pode ser compreendida ao analisar os hidrogramas e sedimentogramas.

No evento observado em 13/07/2016, a antecipação da vazão de pico em relação a concentração máxima de sedimentos em suspensão pode ser devido as condições de transporte das partícula outrora desagregadas. Quando isto ocorre, significa que as partículas que estava num local mais distante na bacia demoram um tempo maior para percorrer a distância entre local fonte e a calha fluvial até chegar à seção de monitoramento.

A concentração de sedimentos máxima também pode antecipar a vazão de pico (Figura 27). No evento do dia 15/08/2016 esta antecipação foi de aproximadamente 20 minutos, provavelmente devido ao fato destes sedimentos estarem depositados nos locais mais próximos da seção de monitoramento ou da calha fluvial e ao atingirem o canal de drenagem, logo após o início das chuvas aumenta a concentração de sedimentos na água, levando a histerese em relação a vazão de pico.

Figura 27 - Hidrograma e sedimentogramas do 6° evento observado em 15/08/2016



Fonte: O autor

Observa-se que na Figura 27 há diminuição da concentração de sedimentos em suspensão desde o seu pico de 124 mg.L^{-1} (às 10:06 h) até um determinado momento (11:00 h), onde a CSS começa a aumentar, atingindo novamente um valor máximo de 66 mg.L^{-1} (11:15 h). Isto pode ser devido às partículas que estavam nos locais mais remotos da bacia terem atingido a calha fluvial, sofrem transporte e chegarem até a seção de monitoramento.

Segundo Minella (2011) o efeito histerese explica muitas vezes o porquê que os modelos utilizados em sedimentologia superestimam as produções de sedimentos. A Tabela 4 apresenta os efeitos de histerese ao longo dos eventos monitorados.

Tabela 4 - Efeitos de histerese dos eventos monitorados na bacia hidrográfica do rio Guamirim, durante os meses de maio a outubro de 2016

Data do evento	Tempo de pico de vazão (h)	Tempo de pico de CSS (h)	Histerese (h)
20/05/2016	15:22	15:42	00:20 negativa
13/07/2016	16:13	16:23	00:10 negativa
14/07/2016	11:08	11:15	00:07 negativa
15/07/2016	10:41	10:52	00:11 negativa
26/07/2016	14:15	14:12	00:03 positiva
15/08/2016	10:26	10:06	00:20 positiva
15/08/2016	11:13	11:15	00:02 negativa
17/08/2016	09:53	09:52	00:01 positiva
17/08/2016	10:12	10:13	00:01 negativa
17/08/2016	10:48	11:03	00:15 negativa
19/08/2016	10:17	10:20	00:03 negativa
29/08/2016	07:18	07:28	00:10 negativa
29/08/2016	07:51	07:51	00:00 negativa
29/08/2016	08:39	08:29	00:10 positiva
29/08/2016	11:59	11:26	00:33 positiva
30/08/2016	13:21	13:36	00:15 negativa
18/09/2016	09:08	09:08	00:00 negativa
18/09/2016	10:43	10:43	00:00 negativa
18/09/2016	12:28	12:30	00:02 negativa
17/10/2016	16:25	16:26	00:01 negativa

Fonte: O autor.

Na Tabela 4 observa-se que o efeito histerese ocorreu em todos os eventos, variando de 1 minuto até 33 minutos. A condição negativa ou positiva apresentada na Tabela 4 indica a diferença entre o tempo de vazão de pico e o tempo de concentração de sedimentos em suspensão máxima. Neste caso, a condição negativa indica que a vazão máxima antecipa a concentração de sedimentos máxima.

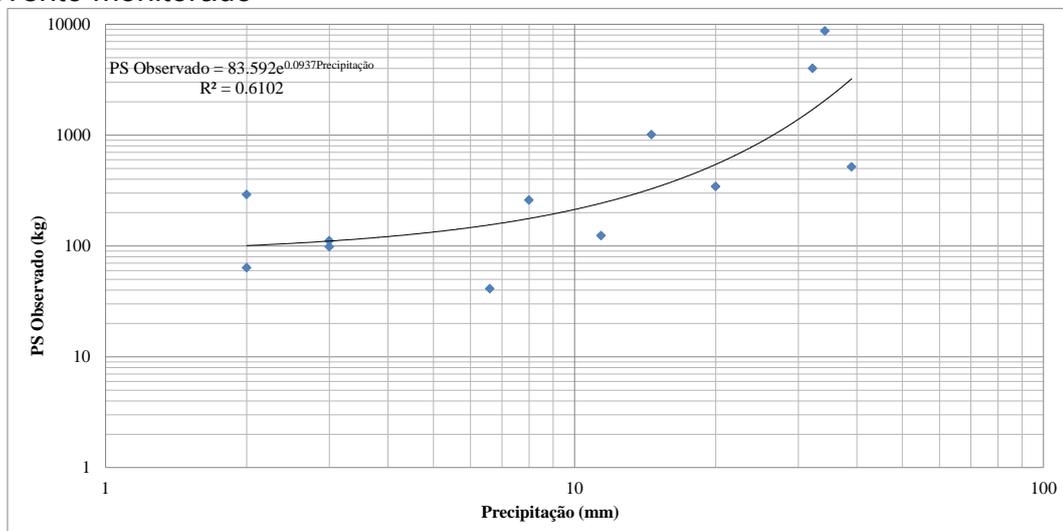
A verificação de forma gráfica das histereses dos eventos podem ser analisadas no APÊNDICE 3 deste trabalho.

5.6 RELAÇÃO ENTRE PRECIPITAÇÃO E PRODUÇÃO DE SEDIMENTOS

Muitos estudos utilizando-se da RUSLE são feitos comparando os efeitos da energia das chuvas na erosão bruta (Santos, 2014). Estes trabalhos colocam em evidência esta energia dissipada sobre os solos e demonstram o potencial que estes eventos chuvosos têm de desagregar as partículas. Sabe-se que a bacia é um sistema que converte chuva em descarga líquida (TUCCI, 2002). Entretanto, junto com a vazão líquida tem a vazão sólida proveniente da erosão da área da bacia hidrográfica e também da erosão do canal (rio). Neste contexto, uma comparação

entre produção de sedimentos e os volumes precipitados é interessante para verificar a relação existente entre estas duas variáveis. A Figura 28 contém a correlação entre as precipitações totais e as produções de sedimentos.

Figura 28 - Relação entre Produção de Sedimentos Observada e total precipitado por evento monitorado



Fonte: O autor.

Observa-se que esta relação entre a precipitação e a produção de sedimentos observada no rio Guamirim não apresentou um bom ajuste, baseado no coeficiente de determinação de Pearson, cujo valor foi de 0,61. Um dos fatores que podem evidenciar esta fraca correlação é o afastamento de cerca de 4 km da estação automática de superfície e a bacia hidrográfica do rio Guamirim.

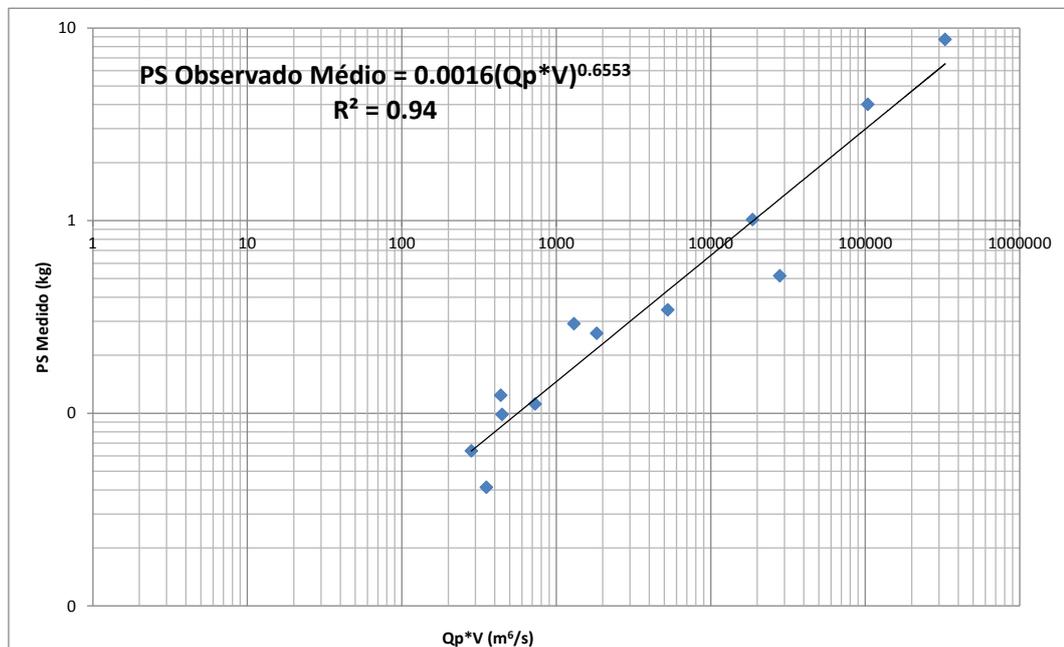
Durante o período de monitoramento (ao longo do ano de 2016), muitos eventos de chuvas observados na área urbana não foram registrados pela estação meteorológica, causando algumas incertezas nas relações entre chuva e produção de sedimentos. Neste caso, não foram coletados dados para a análise. Também deve ser considerado o fato de que as chuvas são registradas com discretização temporal horária. Observou-se que alguns eventos de chuva tiveram duração inferiores a 1 hora, o que leva a um cálculo de intensidade maior, impossibilitando determinar por meio dos dados coletados e disponibilizados pelo INMET a intensidade real dos eventos com duração inferiores a uma hora.

5.7 CALIBRAÇÃO DOS PARÂMETROS DA EQUAÇÃO UNIVERSAL DE PERDA DE SOLOS MODIFICADA

A Equação Universal de Perdas de Solo Modificada (MUSLE) para eventos de chuva, depende basicamente do tipo de solo, condições topográficas, uso do solo, manejo do solo, ocupação do solo e das vazões e volumes gerados pelos eventos de chuva (WISCHEMEIER, 1978).

Dentro deste contexto, os únicos fatores que são considerados variáveis na MUSLE são justamente aqueles que dependem das chuvas: vazão e volume de água. Na Figura 29 são apresentadas as correlações entre volume e vazão máxima (pico) versus produção de sedimentos.

Figura 29 - Relação entre $Q_p \cdot V$ x PS observada



Fonte: O autor.

Esta correlação apresentou excelente ajuste ($R^2 = 0,94$), indicando que existe uma elevada probabilidade de dependência, onde a produção de sedimentos é explicada quase que inteiramente pelos volumes de água gerados e pelas vazões máximas. Vale ressaltar que este modelo considera que todos os demais parâmetros são fixos (constantes) ao longo do tempo como uso do solo. Isto pode ser um limitador já que se observou que na área urbana de São Miguel do Oeste muitas obras civis ocorreram ao longo do período de monitoramento, modificando a disponibilidade de sedimentos na bacia hidrográfica do rio Guamirim.

A partir da análise dos dados coletados foi definida a equação geral para área urbana de São Miguel do Oeste, conforme Equação 25:

$$PS = 0,5792 * (Qp * V)^{0,6553} \quad (25)$$

Em que:

PS = produção de sedimentos em kg;

Qp = vazão de pico ($m^3 \cdot s^{-1}$)

V = volume de água gerado pelo hidrogramas (m^3)

A partir dos 12 eventos monitorados foram realizados os ajustes dos parâmetros de regressão e a calibração para a utilização dos resultados na MUSLE, possibilitando o estudo da produção de sedimentos na microbacia urbana do rio Guamirim. Na Tabela 5 é apresentado um resumo geral dos 12 eventos monitorados ao longo do ano de 2016.

Tabela 5 - Resumo geral das observações de precipitações, vazões e produções de sedimentos de maio a outubro de 2016

Data	P (mm)	Qp (m^3/s)	PS obs (kg)	PS calc (kg)	PS ajust (kg)
20/05/2016	20.0	1.3	344.2	174.2	708.5
13/07/2016	6.6	0.8	41.2	38.3	120.6
14/07/2016	3.0	0.6	98.5	43.7	140.6
15/07/2016	3.0	0.7	111.5	57.6	193.9
26/07/2016	2.0	0.4	63.7	33.8	104.0
15/08/2016	8.0	0.6	259.5	96.3	354.2
17/08/2016	34.2	13.9	8711.8	1764.2	10643.8
19/08/2016	14.6	5.1	1011.5	353.3	1621.2
29/08/2016	39.0	2.8	517.3	444.0	2118.4
30/08/2016	2.0	0.4	291.3	79.6	283.4
18/09/2016	32.2	4.7	4009.5	925.5	5003.1
17/10/2016	11.4	0.6	123.9	43.2	138.6
Total	176.0	32.0	15583.8	4053.6	21430.3

P = precipitação

Qp = vazão de pico

PS obs = produção de sedimentos observada

PS calc = produção de sedimentos calculada

PS ajust = produção de sedimentos ajustada

Fonte: O autor.

As produções de sedimentos variaram de 41,21 kg até 8711,79 kg (valores

observados) e de 104 kg até 10643,8 kg (valores ajustados para a MUSLE). Para os valores calculados pela forma clássica da MUSLE (coeficiente empíricos) a variação foi de 96,27 kg a 1764,2 kg.

Ellis (1996) apresenta alguns valores de concentração de sedimentos em suspensão médios por evento em áreas urbanas de diferentes regiões do mundo (representado pela coluna CSS) (Tabela 6).

Tabela 6 - Concentração de Sedimentos em Suspensão em áreas urbanas

País/Região	Descarga de Sedimento (Mg.km⁻².ano⁻¹)	CSS (mg.L⁻¹)
Reino Unido	49 (35 - 234)	190 (21 - 2582)
França	146 (80 - 265)	364 (15 - 3780)
Alemanha	104 (26 - 150)	170 (46 - 2700)
Escandinávia	-	323 (5 - 1040)
Estados Unidos da América	-	150 (2 - 2890)

Fonte: Ellis, 1996.

A produção de sedimentos anual em termos de Mg.km⁻² por ano varia de 26 a 265 nas regiões estudadas, conferindo uma grande amplitude (ELLIS, 1996). Quando compara-se estes valores com os valores obtidos neste estudo, verifica-se que a microbacia do rio Guamirim apresenta valores da ordem de 8711,79 kg numa área de aproximadamente 1,49 km² (área total da bacia) e em um único evento de chuva, no dia 17/08/2017. Esta produção de sedimentos registrada na bacia hidrográfica do rio Guamirim apresentou uma concentração de sedimentos de 482 mg.L⁻¹.

Ressalta-se que nos demais eventos observados ao longo desta pesquisa não foram constatados valores dessa magnitude. Quando se compara a concentração de sedimentos em suspensão na microbacia do rio Guamirim com os valores informados por Ellis (1996), nota-se que a máxima concentração registrada na área de estudo foi de 501 mg/l, sendo superior ao encontrado em áreas urbanas da França e também aos valores médios encontrados pelo autor nas demais áreas de estudo.

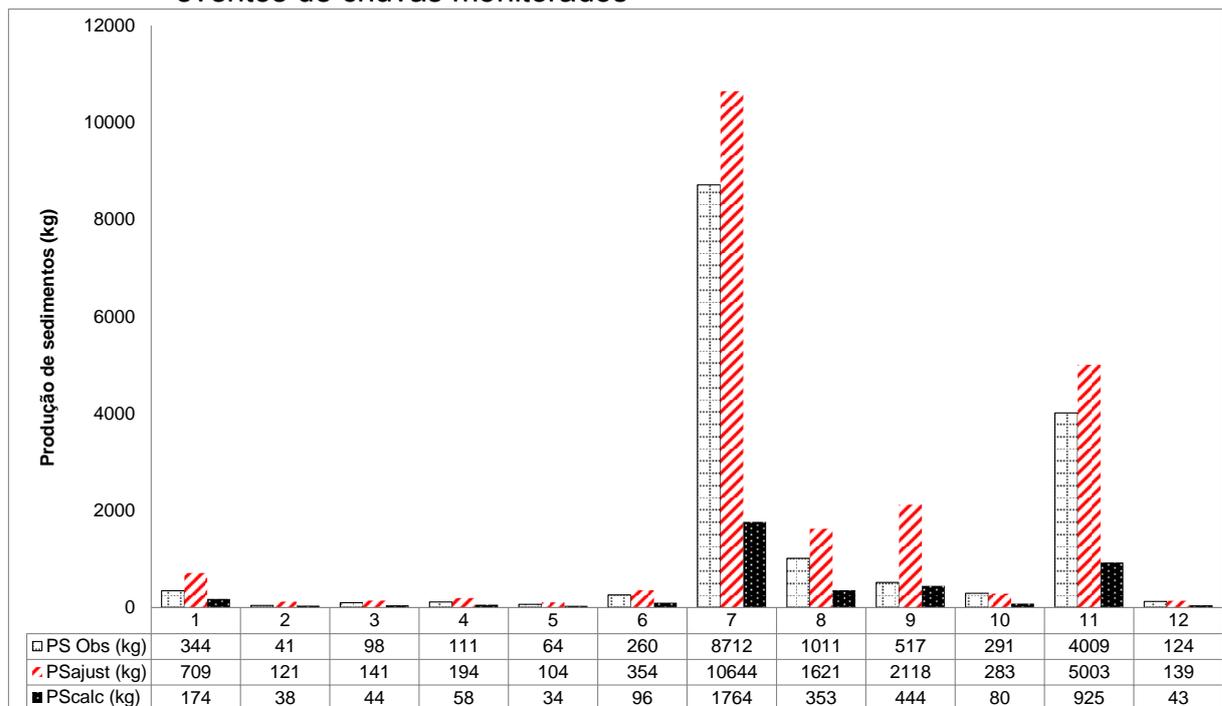
Constata-se que os valores mínimos de produção de sedimentos, tanto observado quanto modelado, não coincidiram num mesmo evento. Houve coincidência entre os valores máximos no evento ocorrido no dia 17/08/2016 (APÊNICE 2).

Scapin (2005) monitorou uma bacia hidrográfica numa área urbana de 4,92 km² em Santa Maria – RS e encontrou produções de sedimentos variando de 12,71 Mg até 1365,8 Mg contabilizados ao longo de um dia. O autor aplicou oito modelos diferentes de estimativa de produção de sedimentos, comparando-os com os valores observados em campo, e encontrou uma grande variabilidade entre os modelos testados com produções de sedimentos variando de 2,86 Mg a 41834,76 Mg para a área de 4,92 km² durante um dia de produção de sedimentos.

A Figura 30 apresenta uma comparação entre os valores observados em campo e os valores preditos pela aplicação da MUSLE (calculada e ajustada) é apresentada.

Ao longo dos seis meses de monitoramento a soma das produções de sedimentos dos doze eventos de chuvas monitorados foi de aproximadamente 15,5 Mg gerados por uma área de cerca de 1,49 km².

Figura 30 - Produção de sedimentos observadas, produção de sedimentos calculadas e produção de sedimentos ajustadas pela MUSLE durante os eventos de chuvas monitorados



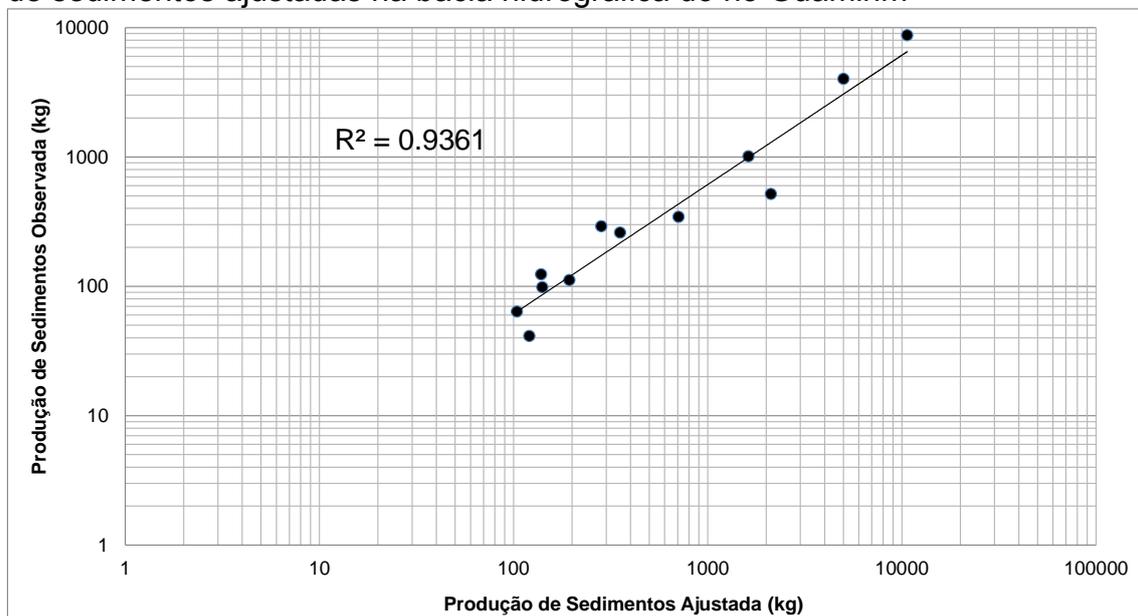
Fonte: O autor.

Na Figura 30, “PS obs” corresponde aos valores das produções de sedimentos medidas no rio Guamirim. “PS calc” representa os valores das produções de sedimentos calculadas pela MUSLE em sua forma tradicional (com os

parâmetros empíricos de ajuste original) e “PS ajust” corresponde aos valores das produções de sedimentos calculadas pela MUSLE com seus parâmetros ajustados para a bacia do rio Guamirim. Em trabalho desenvolvido na área urbana de Teresina, Santos et al. (2014), aplicado a Equação Universal de Perda de Solo para séries de chuvas de longos períodos, encontrou valores de perdas de solo anual numa faixa que varia de 200 Mg.km⁻² até 12700 Mg.km⁻². De forma geral pode se observar que a MUSLE ajustada superestimou as produções de sedimentos em 92% dos eventos (11 de 12 eventos) (Figura 30).

Em relação à MUSLE calculada a partir de seus parâmetros empíricos tradicionais, foi verificado que esta subestimou os valores observados em campo em todos os eventos monitorados. Em estudo feito por Branco (1998) numa bacia de uso e ocupação do solo mista (florestas, áreas urbanas, áreas agrícolas e estradas não pavimentadas) na região central do Estado do Rio Grande do Sul, foi verificado que a MUSLE calculada superestimou as produções de sedimentos em cerca de 80% dos eventos elevadas taxas de erros. Entretanto com o ajuste dos parâmetros na MUSLE (ajustada) o autor obteve um desempenho semelhante ao encontrado nesta pesquisa feita na área urbana de São Miguel do Oeste-SC (Figura 31), com um coeficiente de determinação de 0,92. Entretanto, neste estudo o coeficiente de determinação ficou próximo de 0,94.

Figura 31- Correlação entre as produções de sedimentos observadas e a produção de sedimentos ajustadas na bacia hidrográfica do rio Guamirim



Fonte: O autor.

A Tabela 7 apresenta valores de perdas de solo anual e sua classificação quanto ao grau de erosão, proposta por Galdino (2003).

Tabela 7 - Classificação das perdas de solos e seu respectivo grau de erosão

Perda de Solo (Mg.ha⁻¹.ano⁻¹)	Grau de Erosão
<10	Baixa
10 - 50	Moderada
50 - 200	Alta
>200	Muito Alta

Fonte: Galdino, 2003.

Estas perdas apresentadas por Galdino (2003) podem dar uma ideia do comportamento das produções de sedimentos na microbacia em estudo sendo, portanto uma referência de classificação do grau de produções de sedimentos. Comparando os valores observados para cada evento com os valores da Tabela 6, observa-se que na maioria dos eventos (9 dos 12 eventos monitorados) estas produções de sedimentos variaram de 41 kg a 517 kg caracterizando a bacia com alto grau de erosão. É claro que quando se afirma isso, considerasse que estas produções foram de apenas nove eventos (extrapolando estas produções ao longo de todos os dias de chuva do ano, certamente os valores seriam muito maiores).

A MUSLE ajustada para a microbacia em estudo está de acordo com afirmação de Lefrançois et al. (2007), segundo o qual os modelos utilizados nos estudo de sedimentologia muitas vezes superestimam os valores de produção de sedimentos observados em campo, pois estes não levam em consideração o efeito histerese, conforme item 5.5. Estes modelos, incluindo MUSLE, não detectam o fenômeno transporte de sedimentos, que são muito importantes para realizar o balanço de sedimentos dentro de uma bacia (Minella, 2007).

5. 8 ANÁLISE ESTATÍSTICA DA MUSLE

O coeficiente de eficiência (COE) para a MUSLE calculada neste trabalho foi de 0,21 sendo classificado como um fraco desempenho (Tabela 8). Após o ajuste da MUSLE o COE obtido foi de 0,89, sendo classificado como bom, de acordo com Silva et al. (2008).

Tabela 8- Avaliação do Desempenho da MUSLE calculada e ajustada para a bacia hidrográfica urbana do rio Guamirim

Análise de desempenho	MUSLE calc	MUSLE ajust
COE	0.21	0.89
EMQ (%)	83%	32%

Fonte: O autor.

Verifica-se que o erro médio quadrático (EMQ) da MUSLE calculada (tradicional) apresenta um valor elevado (83%), sendo considerado insatisfatório. Este erro é relativo aos valores observados em campo. Entretanto, após o ajuste dos parâmetros “a” e “b” para a microbacia do rio Guamirim, constata-se uma redução do erro percentual para 32%. Quando se utilizam modelos matemáticos de predição de fenômenos naturais (produção de sedimentos), deve sempre ser considerado o aspecto de aproximação do modelo calibrado com os valores observados em campo (realidade). Neste contexto, o desempenho global da MUSLE ajustada é considerado satisfatório, tendo em vista o seu coeficiente de eficiência e o seu erro médio quadrático.

6 CONCLUSÕES

Após o estudo realizado na microbacia urbana do rio Guamirim, que apresentou uma área de 1,49 km², declividade média de 9,5 % e ocupação predominantemente de áreas construída (64,46%), no que se refere ao estudo da avaliação da produção de sedimentos em suspensão do rio Guamirim, localizada na área urbana de São Miguel do Oeste -SC é possível concluir que:

Com base nos dados coletados nos doze eventos monitorados ao longo do período de levantamento, as produções de sedimentos na bacia do rio Guamirim em sua porção urbana é de 15586,8 Mg, sendo considerada alta, quando comparada com outras bacias urbanas. Uma possível causa seria o intenso uso do solo para execução de obras civis, sendo incluída na classe solo exposta, cujo percentual da área é de 6,3%. A associação dos efeitos das chuvas com as características fisiográficas da bacia hidrográfica também é um dos fatores que contribuiu para estas produções elevadas de sedimentos.

Apesar de muitos trabalhos desenvolvidos em bacias hidrográficas brasileiras com o auxílio da Equação Universal de Perda de Solo clássica e/ou suas variantes indicarem uma superestimativa das produções de sedimentos ou erosão bruta, neste trabalho concluiu-se que a MUSLE clássica (coeficientes empíricos) subestimou as produções de sedimentos observadas em campo em cerca de 4,8 vezes. O total de sedimentos produzidos que foram observados em campo foi de 15586,8 Mg, enquanto que o total de sedimentos estimados pela MUSLE tradicional foi de 4053,6 Mg. A soma das produções de sedimentos estimados pela MUSLE ajustada foi 21430,3 Mg.

Este estudo indicou a importância da calibração dos parâmetros dos modelos, pois os ajustes devem ser considerados para as condições que o estudo foi desenvolvido.

A partir da calibração dos parâmetros “a” e “b” da MUSLE para a microbacia do rio Guamirim, com os que considerados apenas doze eventos monitorados. Esta conclusão está fundamentada nos valores calculados pelo coeficiente de eficiência – COE e também nos valores dos erros médios quadráticos (EMQ), sendo 0,89 e 32%, respectivamente.

A MUSLE tradicional subestimou as produções de sedimentos enquanto que

a MUSLE ajustada superestimou estas produções. Quando comparado com os valores observados (15586,8 Mg) conclui-se que em média a MUSLE ajustada superestimou em aproximadamente 20%. O conceito de sub ou superestimativa é em referência as produções de sedimentos observadas.

Desta forma, conclui-se que a MUSLE ajustada pode ser aplicada na microbacia do rio Guamirim em sua porção urbana, pois a eficiência do modelo estimada pelo teste Nash-Suttcliffe foi de cerca de 89% em relação a descarga de sedimentos observadas, considerando os doze eventos monitorados e também que os demais parâmetros da equação não se alteram, como o uso e ocupação do solo.

Outro aspecto a ser observado é a qualidade dos dados de entrada nos modelos empíricos, garantindo uma boa calibração das equações que descrevem os fenômenos hidrossedimentológicos. A qualidade do modelo numérico do terreno é sem dúvida um dos pontos positivos deste estudo, pois a resolução do pixel é na ordem de 1 m.

Por fim, recomenda-se a continuidade do monitoramento hidrosedimentométrico na área urbana de São Miguel do Oeste – SC. Esta sugestão é em virtude da dinâmica das áreas urbanas em relação as modificações do uso do solo em decorrência das obras civis. Recomenda-se também a instalação de mais pontos de monitoramento de nível, vazão, concentração de sedimentos em suspensão além de mais pluviógrafos para que as pesquisas científicas possam ser fundamentadas em informações consistentes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS). NBR-13.133 - **Execução de levantamentos topográficos**. Rio de Janeiro. 1994.

ALÉSIO, M. **Processos hidrossedimentológicos em diferentes escalas espaço temporais no bioma mata atlântica**. Dissertação apresentada ao Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa (RS), 2010, 118p.

AZEVEDO NETTO, J. M. de. **Manual de hidráulico**. 8ª ed. São Paulo-SP, 1998.

BRANCO, N., **Avaliação da produção de sedimentos de eventos chuvosos em uma pequena bacia hidrográfica rural de encosta**. Dissertação de mestrado. Santa Maria-RS, 1998.

BURROUGH P. A., and MCDONNELL R. A. **Principles of Geographical Information Systems**: Oxford University Press, London, 1998.

CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia prática**. 2ª edição; revisada; atual e ampliada, Rio de Janeiro – RJ: interciência, 2008, 599 p.

CARVALHO, N. O.; FILIZOLA JR, N. P.; SANTOS, P. M. C.; Lima, J. E. F. W. **Guia de práticas sedimentométricas**. Brasília: ANEEL, 2000, 132p.

CHAVES, H. M. L. Estimativa da erosão atual e potencial no Vale do São Francisco. **Relatório final de Consultoria**. CODEVASF/FAO, Brasília. 1994.

CHEVALLIER, P. **As precipitações na região de Cruz Alta e Ijuí (RS - Brasil)**. Porto Alegre: Instituto de Pesquisas Hidráulicas da UFRGS. (Recursos Hídricos. Publicação n. 24). 1991.

DESMET, P. J. & GOVERS, G. A GIS procedure for automatically calculating the USLE LS factor on topographically complex landscape units. **J. Soil Water Conservation.**, 51:427-433, 1996.

ELLIS, J. B. 1996 **Sediment yield and BMP control strategies in urbancatchments. Proceedings Erosion and sedimet yield: Global and regional perspectives**. IAHS, Exeter. July.

ESRI - Maps throughout this book were created using *ArcGis*® software by Esri. *ArcGis*® and *ArcMap*™ are the intellectual property of Esri and are used herein under license. Copyright © Esri. All rights reserved. For more information about Esri® software, please visit www.esri.com.

FARINASSO, M.; CARVALHO JÚNIOR, O. A.; GUIMARÃES, R. F.; GOMES, R. A. T.; RAMOS, V. M.. Avaliação qualitativa do potencial de erosão Laminar em grandes áreas por meio da EUPS – Equação Universal de Perdas de Solos utilizando novas metodologias em SIG para os cálculos dos seus fatores na região do Alto Parnaíba – PI-MA. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 7, n. 2. 2006.

FOOD BALANCE SHEETS. **Food and Agriculture Organization of the United Nations**, Rome, 2002.

GALDINO, S.; VIEIRA, L.M.; SORIANO, B.M.A. **Perdas de solo na bacia do alto Taquari. Corumbá. Corumbá, Embrapa Pantanal**. 2003. 40p. (Boletim técnico, 52).

GOOGLE IMAGENS. Transporte de sedimentos em corpos d'água. Disponível em : <https://www.google.pt/>. Acesso em 30.03.2017.

GOUDIE, A. **The human impact on the natural environment: past, present, and future. Blackwell Pub.**, 2006.

HOROWITZ, A. J. An evaluation of sediment rating curve for estimating suspended sediment concentration for subsequent flux calculation. **Hydrological Process**, v. 17, p. 3387-3409, 2003.

HOROWITZ, A.J; CLARKE, T.R; MERTEN, G.H. **The effects of sample scheduling and sample numbers on estimates of the annual fluxes of suspended sediment in fluvial systems**. *Hydrol. Process*. 2014. DOI 10.1007/s11368-013-0813-0.

IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Censo demográfico 2010. Disponível em: <<http://censo2010.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 12 10. 2016.

JACCON, G. CUDO, K. J. 1989. Curva-chave: Análise e traçado. Brasília:DEAEE, 273 p.

KOBIYAMA, M. **Manejo de bacias hidrográficas: conceitos básicos**. In: Curso de Extensão: Manejo de bacias hidrográficas sob a perspectiva florestal. Curitiba: Curso de Eng. Florestal UFPR, 1999. p.52-54. (Apostila do curso). Disponível em: <<http://www.labhidro.ufsc.br/Artigos/bacia.pdf>> . Acesso em: 24 de setembro de 2011.

LEFRANCOIS, J.; Grimaldi, C.; Gascuel-Oudoux, C.; Gilliet, N. **Suspended sediment and discharge relationships to identify bank degradation as a main sediment source on small agricultural catchments**. *Hydrological Processes*, v.21, p.2923-2933, 2007.

LEOPOLD, L. T. 1968 **Hydrology for urban planning - A guide book on the Hydrologic effects of urban land use**. USGS circ. 554 18 p.

LOPES, Nadia Hidemi Yano ; GODOY, Fabio Bertini ; KOBIYAMA, Masato . Análise da produção de água e de sedimento em uma microbacia experimental com a aplicação do modelo SWAT. In: VI Simpósio Brasileiro de Engenharia Ambiental, 2008, Serra Negra. **VI Simpósio Brasileiro de Engenharia Ambiental**, 2008.

MACHADO, R.E. & VETTORAZZI, C.A. Simulação da produção de sedimentos para a microbacia hidrográfica do Ribeirão dos Marins, SP. **R. Bras. Ci. Solo**, 27:735-741, 2003.

MELLO, E. L. DE; BERTOL, I.; ZAPAROLLI, A. L. V.; CARRAFA, M. R. Perdas de solo e água em diferentes sistemas de manejo de um nitossolo háplico submetido à chuva simulada. **Revista Brasileira de Ciência de Solo**, Viçosa, MG, v. 27, n. 5, p. 901-909, set./out. 2003.

MENDIONDO, E. M.; TUCCI, C. E. M. (1997). "Escalas Hidrológicas I: Conceitos". In: **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v, 02, n.02, p. 21-44.

MOORE, I. D.; BURCH, G. J. Modeling erosion and deposition: Topographic effects. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 29:1624-1640, 1986.

MERTEN, G. H. et al. **Determinação da concentração de sedimentos em suspensão em rios com o uso de turbidímetro**. Porto Alegre: Ufrgs, 2014. 97 p.

MERTEN, G. H.; MINELLA, J. P. G.; MORO; MAIER, C.; PERGER, R. **Determinação da concentração de sedimentos em suspensão em rios com o uso do turbidímetro**. Curso de turbidimetria. 2011. Porto Alegre, 2011.

MINELLA, J. P. G. **Utilização de técnicas hidrossedimentométricas combinadas com a identificação de fontes de sedimentos para avaliar o efeito do uso e do manejo do solo nos recursos hídricos de uma bacia hidrográfica rural no Rio Grande do Sul**. Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul-UFRGS, RS, 2007. 162 p.

Minella, J. P. G., Merten, G. H; Magnano, P. F; Reichert, J. M.; Baros, C. A. P. de; Dalbianco, L. **Efeito de histerese na produção de sedimentos em bacia sob intenso processo erosivo**. In: **Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos, 2011**, Porto Alegre. **Anais: Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos**. Porto Alegre: ABRH, 2011.

PAIVA, J. B de; PAIVA, E. M. C. D. de.(orgs). **Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas**. (Ed. Rev) Porto Alegre: ABRH, 2003.

PIMENTEL et al. "Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits." *Science* 267: 1117-1123, 2006.

SANTOS, A.T.; ALLASIA, D.G.P.; COLLISCHONN, L.S.G.; TASSI, R.; **Estimativa da perda de solo por erosão laminar em área urbana – estudo de caso no município de Teresina – PI**. In: XI Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos, 2014, Porto Alegre. **Anais: Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos**. Porto Alegre: ABRH, 2014.

SANTOS, I. dos. (organizador). **Hidrometria Aplicada**, ed. il. Color.cm., Curitiba, 2001, 372 p.

SCAPIN, J. Caracterização do Transporte de sedimentos em um pequeno rio urbano da cidade de Santa Maria – RS. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa (RS), 2005, 116p.

SILVA, P.M.O.; MELLO, C.R.; SILVA, A.M. & COELHO, G. Modelagem da hidrografia de cheia em uma bacia hidrográfica da região Alto Rio Grande. **R. Bras. Eng.Agric. Amb.**, 12:258-265, 2008.

SILVEIRA, A.L.L. (2005). “Desempenho de formulas de tempo de concentração em bacias urbanas e rurais”. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos** 10, p.5-23.

SECRETARIA DE ESTADO DO DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO SUSTENTÁVEL – SDS. **Levantamento aerofotogramétrico**. Santa Catarina, 2016.

STEIN, D.P.; Donzelli, P.; Gimenez, A.F.; Ponçano, W.L.; Lombardi Neto, F. Potencial de erosão Laminar natural e antrópica na bacia do Peixe-Paranapanema. In: **Simpósio Nacional de Controle de Erosão, 4**. Anais..., Marília. p. 105-135. 1987.

TUCCI, Carlos E. M. 2002. **Regionalização de vazões**. Editora da Universidade. UFRGS. 1ª edição. Porto Alegre.

TUCCI, C. E. M.; Genz, F. 1995 **Controle do impacto da urbanização In: Drenagem urbana**. Tucci, C. E. M.; Porto, R. L. L.; Barros, M. T. ABRH 428 p.

WILLIAMS, J. R. (1975). **Sediment-yeld prediction with universal equation using runoff energy factor**. USDA, Agricultural Research Service, ARS- 5 - 40 , 244-252

WISCHEMEIER & SMITH. Predicting Rainfall Erosion Losses: A Guide to Conservation Planning. **USDA agriculture Handbook** 537, 1978.

APÊNDICES

APÊNDICE 1: Planilha de ajuste da curva-chave do rio Guamirim.

N _{obs}	Cota	h-h ₀	Q _{obs}	X=ln(h-h ₀)	Y=ln(Q)	XY	X ²	Q _{calc.}	(Q _{obs} -Q _{calc.}) ²
1.00	0.36	0.21	0.05	-1.58	-3.06	4.84	2.50	0.06	0.00017
2.00	0.36	0.21	0.05	-1.58	-3.00	4.74	2.50	0.06	0.00010
3.00	0.47	0.32	0.14	-1.15	-1.95	2.25	1.33	0.17	0.00071
4.00	0.49	0.34	0.16	-1.09	-1.82	1.99	1.19	0.20	0.00112
5.00	0.52	0.37	0.19	-1.01	-1.67	1.68	1.01	0.24	0.00276
6.00	0.57	0.42	0.28	-0.88	-1.28	1.12	0.77	0.33	0.00246
7.00	0.65	0.50	0.56	-0.70	-0.58	0.41	0.49	0.50	0.00329
8.00	0.63	0.48	0.54	-0.74	-0.62	0.46	0.55	0.45	0.00756
9.00	0.56	0.41	0.24	-0.90	-1.41	1.27	0.81	0.31	0.00408
10.00	0.82	0.67	1.37	-0.41	0.31	-0.13	0.17	1.02	0.11747
11.00	0.89	0.74	1.79	-0.31	0.58	-0.18	0.09	1.30	0.23734
12.00	0.80	0.65	1.34	-0.44	0.29	-0.13	0.19	0.95	0.14825
13.00	0.73	0.58	0.87	-0.55	-0.14	0.08	0.30	0.72	0.02222
14.00	0.57	0.42	0.31	-0.88	-1.19	1.04	0.77	0.33	0.00048
15.00	0.58	0.43	0.33	-0.85	-1.11	0.95	0.73	0.35	0.00035
16.00	0.63	0.48	0.46	-0.74	-0.77	0.57	0.55	0.45	0.00005
17.00	0.68	0.53	0.63	-0.64	-0.46	0.30	0.41	0.58	0.00286
18.00	0.73	0.58	0.85	-0.55	-0.17	0.09	0.30	0.72	0.01575
19.00	0.77	0.62	1.11	-0.48	0.10	-0.05	0.23	0.85	0.06686
20.00	0.42	0.27	0.09	-1.32	-2.44	3.23	1.75	0.11	0.00058
21.00	0.48	0.33	0.15	-1.12	-1.89	2.12	1.26	0.18	0.00096
22.00	0.52	0.37	0.21	-1.01	-1.56	1.57	1.01	0.24	0.00095
23.00	0.60	0.45	0.38	-0.81	-0.97	0.79	0.65	0.39	0.00011
24.00	0.69	0.54	0.70	-0.62	-0.35	0.22	0.39	0.60	0.00983
25.00	0.68	0.53	0.66	-0.64	-0.41	0.26	0.41	0.58	0.00724
26.00	0.64	0.49	0.49	-0.72	-0.71	0.51	0.52	0.48	0.00022
27.00	0.46	0.31	0.13	-1.18	-2.07	2.45	1.40	0.16	0.00086
28.00	0.60	0.45	0.38	-0.81	-0.97	0.79	0.65	0.39	0.00011
29.00	0.65	0.50	0.57	-0.70	-0.56	0.39	0.49	0.50	0.00516
30.00	0.66	0.51	0.59	-0.68	-0.53	0.36	0.46	0.53	0.00422
31.00	0.57	0.42	0.31	-0.88	-1.19	1.04	0.77	0.33	0.00048
32.00	0.36	0.21	0.05	-1.58	-3.03	4.78	2.50	0.06	0.00013
33.00	0.41	0.26	0.08	-1.36	-2.49	3.40	1.86	0.10	0.00034
34.00	0.46	0.31	0.13	-1.18	-2.02	2.39	1.40	0.16	0.00053
35.00	0.51	0.36	0.20	-1.03	-1.59	1.65	1.07	0.22	0.00047
36.00	0.56	0.41	0.30	-0.90	-1.21	1.09	0.81	0.31	0.00011
37.00	0.62	0.47	0.43	-0.76	-0.85	0.65	0.58	0.43	0.00000
38.00	0.56	0.41	0.28	-0.90	-1.26	1.14	0.81	0.31	0.00068
39.00	0.49	0.34	0.16	-1.09	-1.81	1.98	1.19	0.20	0.00103
40.00	0.44	0.29	0.10	-1.25	-2.26	2.82	1.57	0.13	0.00075
41.00	0.25	0.10	0.01	-2.34	-4.76	11.15	5.49	0.01	0.00000
42.00	0.24	0.09	0.01	-2.45	-4.93	12.11	6.02	0.01	0.00000
43.00	0.23	0.08	0.01	-2.58	-5.12	13.19	6.64	0.01	0.00000
44.00	0.21	0.06	0.00	-2.88	-5.50	15.85	8.31	0.00	0.00000
45.00	0.38	0.23	0.10	-1.49	-2.35	3.50	2.21	0.07	0.00041
46.00	0.38	0.23	0.08	-1.49	-2.48	3.68	2.21	0.07	0.00008
47.00	0.38	0.23	0.09	-1.49	-2.41	3.58	2.21	0.07	0.00023
48.00	0.39	0.24	0.10	-1.44	-2.32	3.35	2.08	0.08	0.00022
49.00	0.39	0.24	0.09	-1.44	-2.39	3.45	2.08	0.08	0.00008
50.00	0.42	0.27	0.11	-1.32	-2.21	2.92	1.75	0.11	0.00000
51.00	0.41	0.26	0.11	-1.36	-2.23	3.03	1.86	0.10	0.00005
52.00	0.42	0.27	0.11	-1.32	-2.20	2.91	1.75	0.11	0.00000
53.00	1.00	0.85	2.51	-0.17	0.92	-0.15	0.03	1.82	0.46972
54.00	0.42	0.27	0.11	-1.32	-2.18	2.89	1.75	0.11	0.00000
55.00	1.53	1.38	6.66	0.32	1.90	0.61	0.10	5.92	0.55093
56.00	1.72	1.57	8.10	0.45	2.09	0.94	0.20	8.10	0.00003
57.00	1.94	1.79	11.72	0.58	2.46	1.43	0.34	11.13	0.34675
58.00	1.25	1.10	3.83	0.09	1.34	0.12	0.01	3.41	0.17563
59.00	1.46	1.31	4.00	0.27	1.39	0.37	0.07	5.22	1.47566
60.00	1.40	1.25	3.60	0.22	1.28	0.28	0.05	4.66	1.11984
61.00	1.33	1.18	3.50	0.16	1.25	0.20	0.03	4.05	0.29633
62.00	1.32	1.17	3.38	0.15	1.22	0.19	0.02	3.97	0.34663
63.00	1.23	1.08	2.86	0.07	1.05	0.08	0.01	3.27	0.16443
64.00	1.20	1.05	2.65	0.04	0.97	0.04	0.00	3.05	0.16139
65.00	1.15	1.00	2.45	0.00	0.90	0.00	0.00	2.71	0.06744
66.00	1.09	0.94	2.33	-0.07	0.85	-0.06	0.00	2.33	0.00002
67.00	1.03	0.88	2.12	-0.13	0.75	-0.10	0.02	1.99	0.01913
68.00	0.98	0.83	1.84	-0.19	0.61	-0.12	0.04	1.72	0.01369
69.00	2.25	2.10	16.35	0.74	2.79	2.07	0.55	16.39	0.00239
70.00	0.90	0.75	1.72	-0.29	0.54	-0.16	0.09	1.35	0.13722

APÊNDICE 2 : Resumo das CSS observadas:

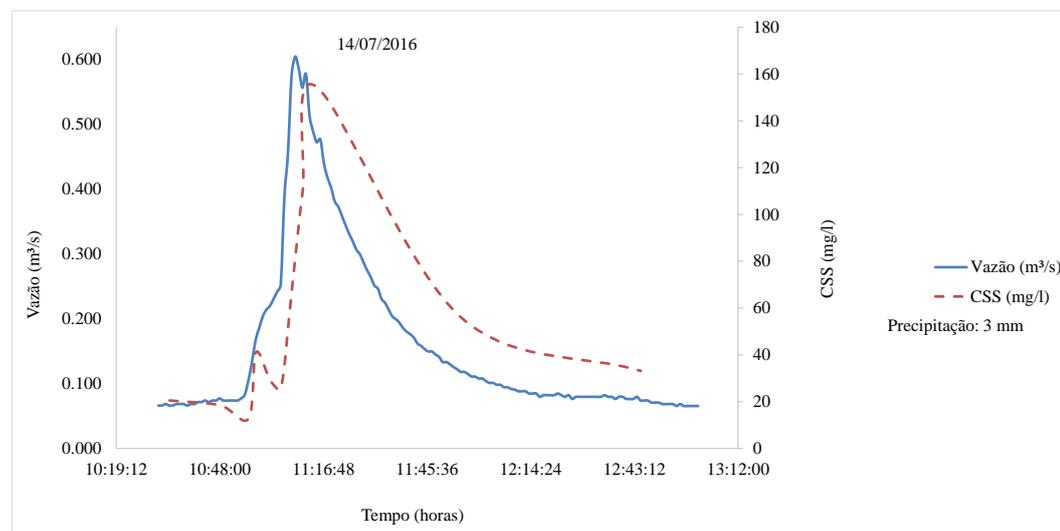
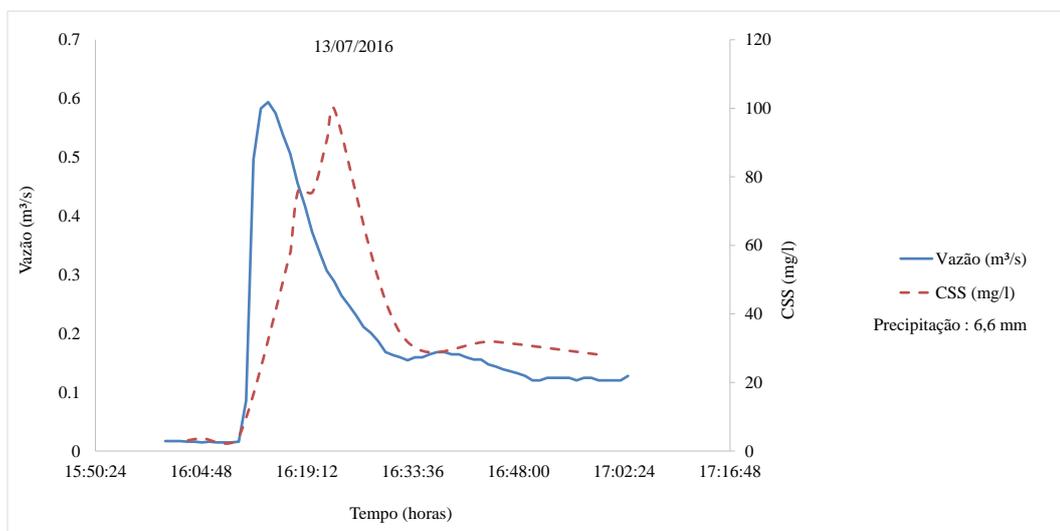
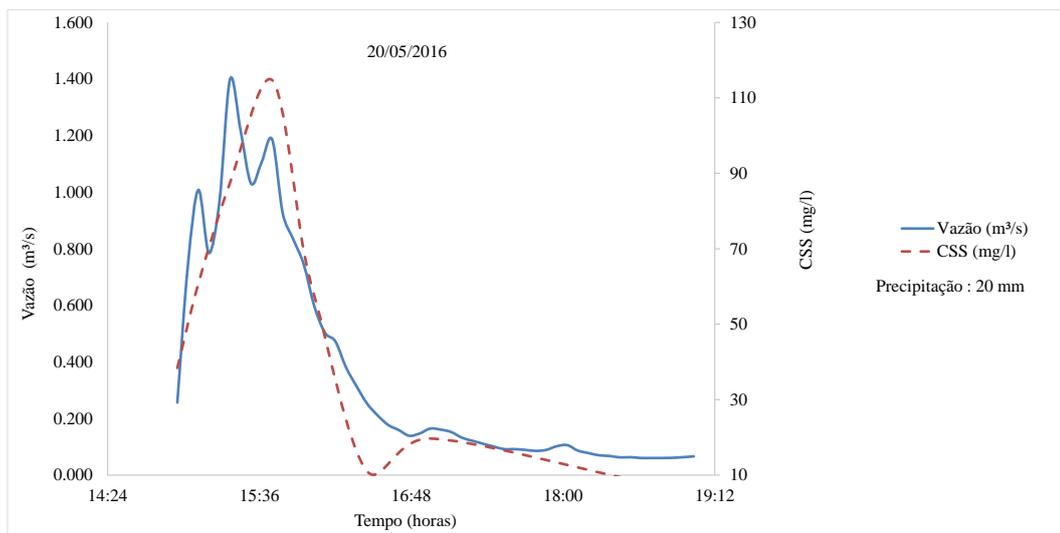
Data	Hora	Nível (cm)	Q (m³/s)	CSS (mg/l)
20/05/2016	14:57	53	40419	38
20/05/2016	15:07	82	116504	61
20/05/2016	15:22	89	142099	88
20/05/2016	15:42	86	130765	115
20/05/2016	15:57	80	109734	69
20/05/2016	16:03	73	87884	56
20/05/2016	16:27	36	15800	11
20/05/2016	16:57	46	28658	20
20/05/2016	18:37	36	15800	8
13/07/2016	16:03	26	7160	3
13/07/2016	16:05	26	7160	4
13/07/2016	16:10	25	6508	4
13/07/2016	16:17	57	48224	58
13/07/2016	16:17	58	50303	58
13/07/2016	16:18	63	61478	76
13/07/2016	16:20	68	73991	76
13/07/2016	16:22	73	87884	92
13/07/2016	16:23	77	100021	99
13/07/2016	16:32	41	21671	34
13/07/2016	16:45	40	20409	32
13/07/2016	17:00	38	18018	28
14/07/2016	10:34	37	16887	21
14/07/2016	10:48	38	18018	18
14/07/2016	10:56	42	22977	13
14/07/2016	10:58	48	31778	41
14/07/2016	11:02	52	38593	29
14/07/2016	11:05	60	54616	26
14/07/2016	11:08	69	76658	68
14/07/2016	11:11	68	73991	110
14/07/2016	11:15	64	63873	154
14/07/2016	11:55	43	24329	56
14/07/2016	12:45	38	18018	33
15/07/2016	10:00	43	24329	20
15/07/2016	10:25	43	24329	23
15/07/2016	10:38	48	31778	27
15/07/2016	10:39	60	54616	56
15/07/2016	10:40	71	82159	87
15/07/2016	10:42	71	82159	90
15/07/2016	10:52	62	59138	130
15/07/2016	11:40	46	28658	32
15/07/2016	12:40	43	24329	19
25/07/2016	13:30	37	16887	24
26/07/2016	13:53	36	15800	21
26/07/2016	13:57	41	21671	28
26/07/2016	14:01	46	28658	39
26/07/2016	14:07	51	36816	49
26/07/2016	14:10	56	46197	63
26/07/2016	14:12	62	59138	82
26/07/2016	14:22	56	46197	63
26/07/2016	14:32	49	33409	44
26/07/2016	14:44	44	25726	35
26/07/2016	15:15	41	21671	27
26/07/2016	16:40	41	21671	18
15/08/2016	09:45	41	21671	23
15/08/2016	09:48	47	30194	28
15/08/2016	09:52	53	40419	43
15/08/2016	09:54	60	54616	60
15/08/2016	10:00	64	63873	109
15/08/2016	10:06	64	63873	124
15/08/2016	10:26	68	73991	77
15/08/2016	10:58	65	66321	54
15/08/2016	11:15	68	73991	66
15/08/2016	11:36	60	54616	51
15/08/2016	12:03	50	35088	44
15/08/2016	13:13	47	30194	33
17/08/2016	09:35	36	15800	13
17/08/2016	09:52	187	858755	482
17/08/2016	10:01	159	579753	390
17/08/2016	10:13	211	1150465	446

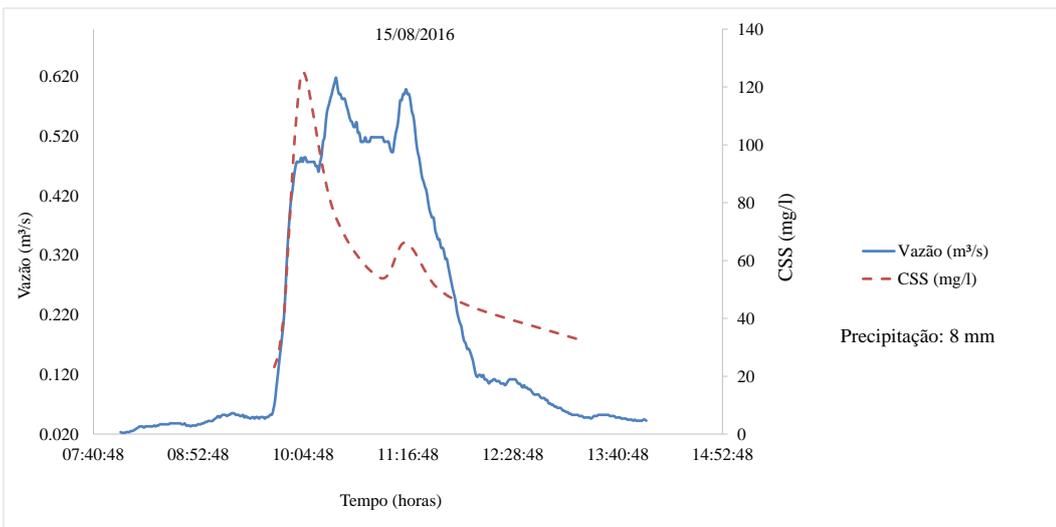
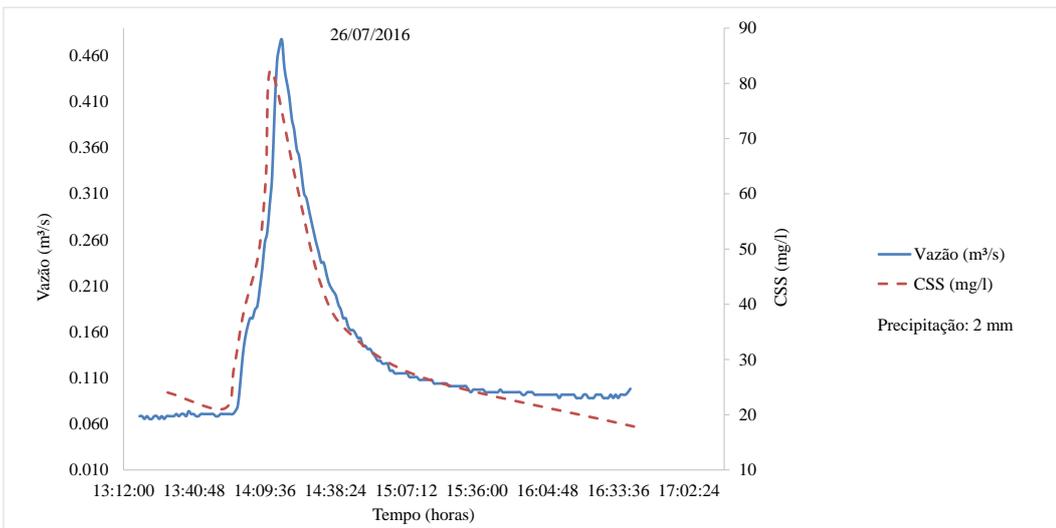
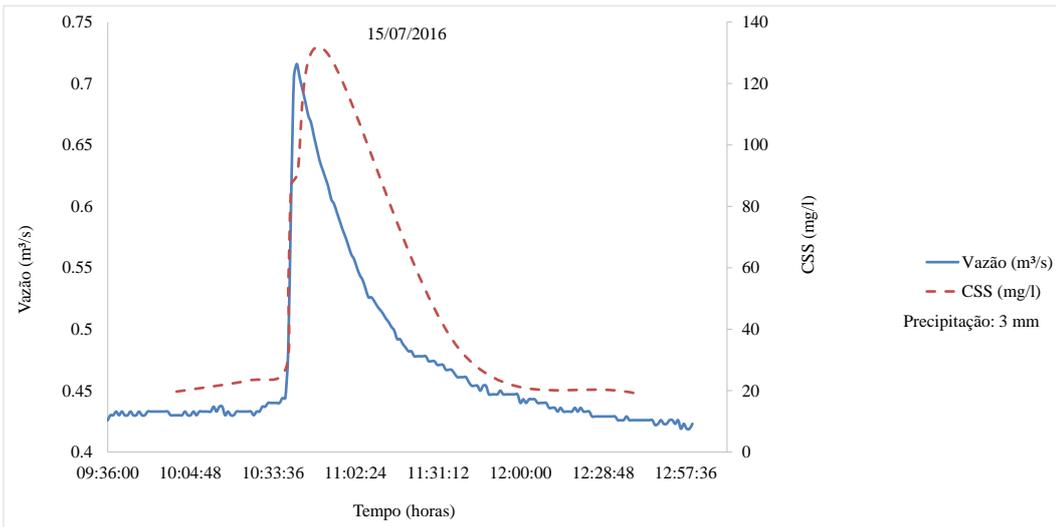
continua

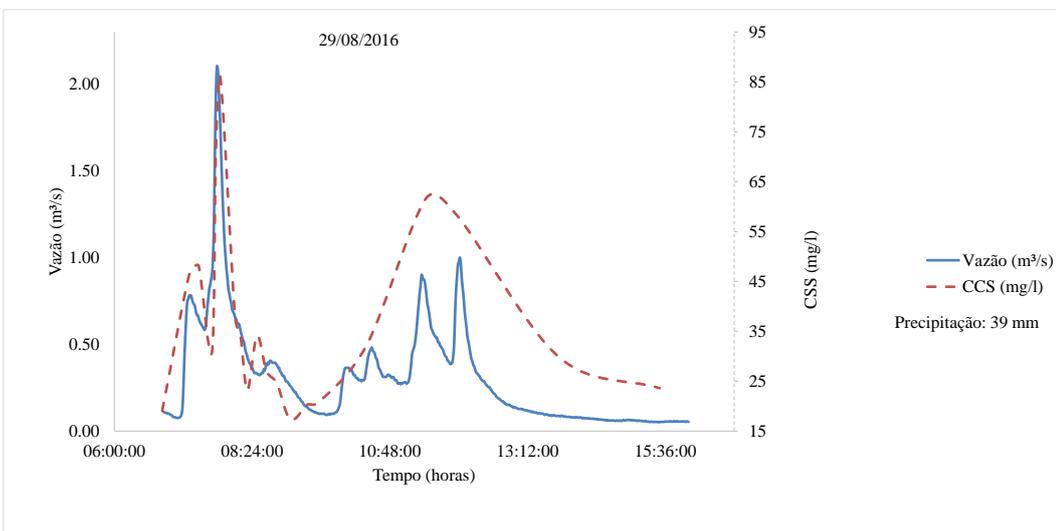
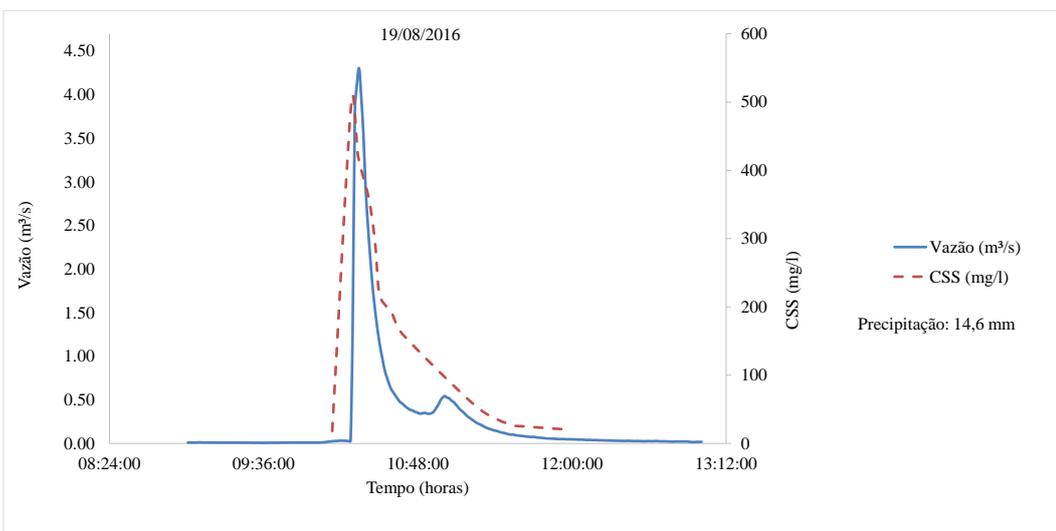
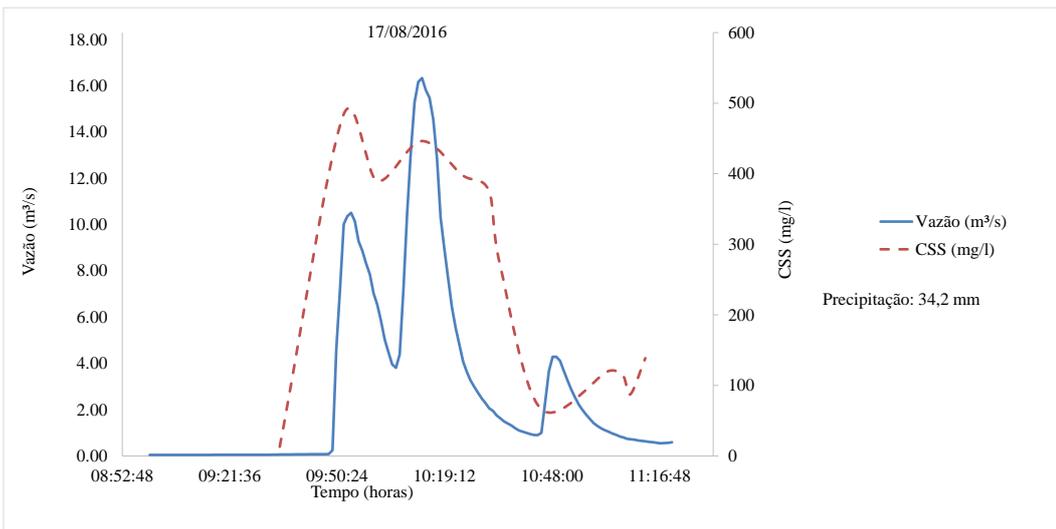
Conclusão

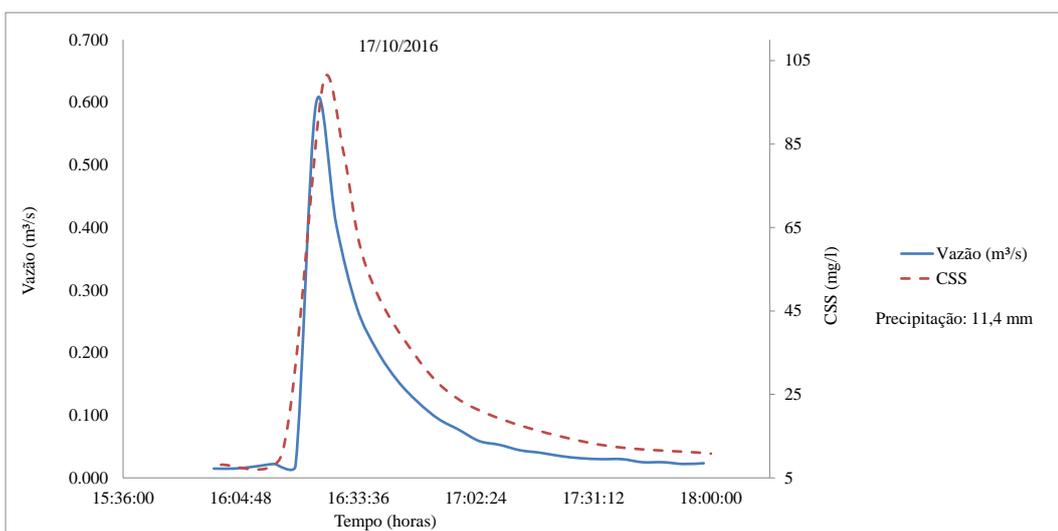
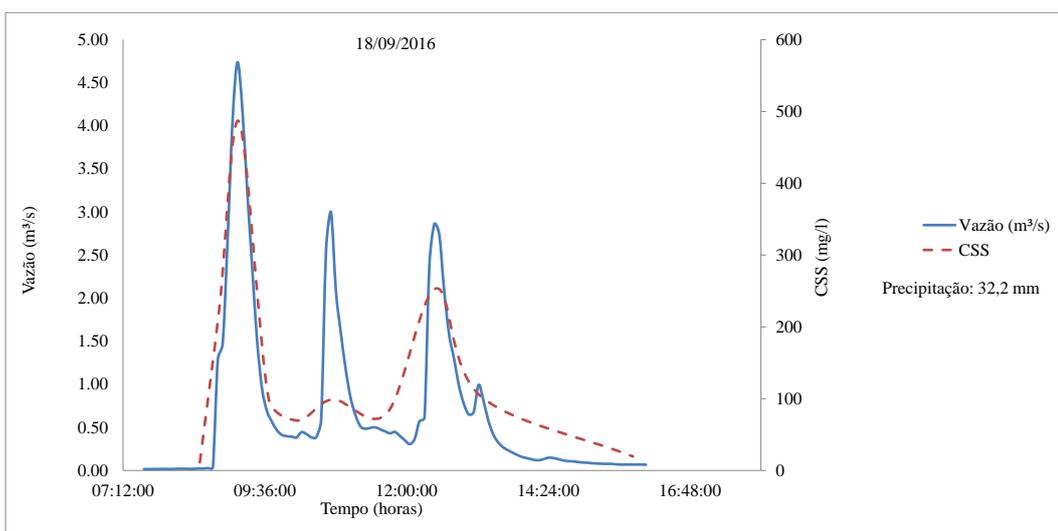
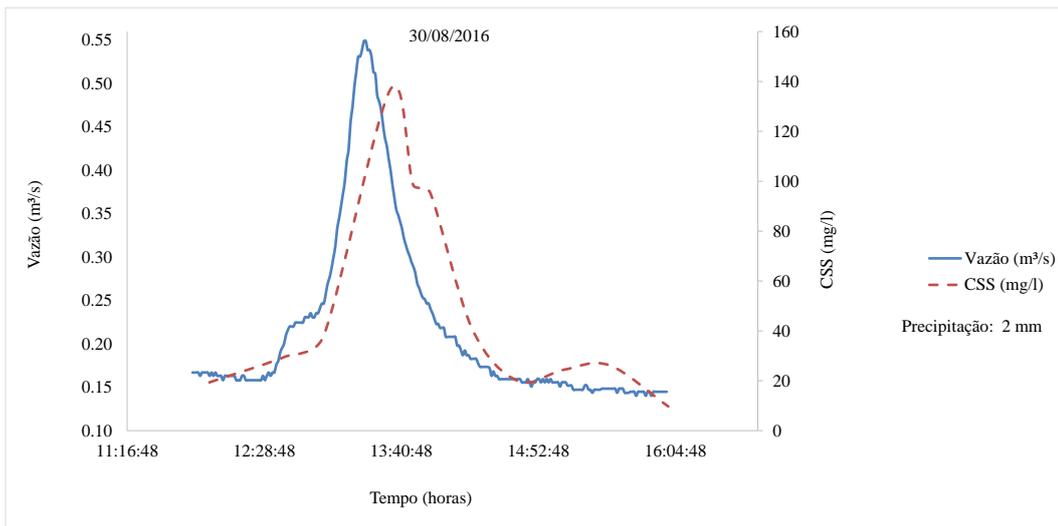
17/08/2016	10:24	134	383060	398
17/08/2016	10:31	105	212139	377
17/08/2016	10:34	94	162231	272
17/08/2016	10:45	81	113089	67
17/08/2016	11:03	83	119979	120
17/08/2016	11:07	74	90832	114
17/08/2016	11:09	71	82159	87
17/08/2016	11:13	68	73991	139
19/08/2016	10:08	38	18018	18
19/08/2016	10:17	130	355942	501
19/08/2016	10:20	145	463741	423
19/08/2016	10:25	115	264463	360
19/08/2016	10:28	101	193081	295
19/08/2016	10:30	92	153990	219
19/08/2016	10:34	83	119979	198
19/08/2016	10:36	68	73991	191
19/08/2016	10:41	73	87884	160
19/08/2016	11:15	64	63873	55
19/08/2016	11:30	54	42295	29
19/08/2016	11:40	50	35088	24
19/08/2016	12:00	45	27169	20
29/08/2016	06:50	42	22977	19
29/08/2016	07:18	86	130765	46
29/08/2016	07:28	83	119979	48
29/08/2016	07:42	92	153990	31
29/08/2016	07:46	116	270070	71
29/08/2016	07:51	109	232258	85
29/08/2016	08:06	83	119979	38
29/08/2016	08:12	79	106438	34
29/08/2016	08:19	74	90832	23
29/08/2016	08:29	69	76658	34
29/08/2016	08:39	72	84993	27
29/08/2016	08:50	71	82159	25
29/08/2016	09:04	65	66321	17
29/08/2016	09:22	56	46197	20
29/08/2016	09:33	53	40419	21
29/08/2016	10:24	59	52433	32
29/08/2016	11:26	76	96900	62
29/08/2016	12:00	80	109734	58
29/08/2016	13:45	40	20409	30
29/08/2016	15:30	35	14754	24
30/08/2016	12:00	46	28658	19
30/08/2016	12:40	50	35088	30
30/08/2016	13:00	53	40419	38
30/08/2016	13:35	61	56850	137
30/08/2016	13:47	53	40419	99
30/08/2016	13:56	50	35088	95
30/08/2016	14:18	46	28658	41
30/08/2016	14:42	45	27169	20
30/08/2016	15:06	45	27169	24
30/08/2016	15:30	44	25726	26
30/08/2016	16:01	44	25726	10
18/09/2016	08:30	30	10142	11
18/09/2016	08:50	88	138259	228
18/09/2016	09:10	141	433355	486
18/09/2016	09:40	70	79380	99
18/09/2016	10:10	60	54616	69
18/09/2016	10:45	119	287307	99
18/09/2016	11:40	63	61478	79
18/09/2016	12:30	117	275746	253
18/09/2016	13:15	72	84993	104
18/09/2016	15:50	36	15800	19
17/10/2016	16:00	27	7849	8
17/10/2016	16:15	29	9339	11
17/10/2016	16:25	69	76658	100
17/10/2016	16:30	64	63873	83
17/10/2016	16:35	54	42295	57
17/10/2016	16:45	45	27169	38
17/10/2016	17:00	37	16887	23
17/10/2016	17:30	31	10984	13
17/10/2016	18:00	29	9339	11

APÊNDICE 3: Hidrogramas e Sedimentogramas dos eventos analisados.









APÊNDICE 4: Coleta e levantamento de dados em campo.



APÊNDICE 5: Procedimentos laboratoriais.

