

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

**ACUMULAÇÃO E TRANSPORTE DE SEDIMENTOS  
NA MICRODRENAGEM: MONITORAMENTO E  
MODELAGEM**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Ana Paula Gomes**

**Santa Maria, RS, Brasil  
2008**

**ACUMULAÇÃO E TRANSPORTE DE SEDIMENTOS NA  
MICRODRENAGEM: MONITORAMENTO E MODELAGEM**

**por**

**Ana Paula Gomes**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia Civil, Área de Concentração em Recursos Hídricos e  
Saneamento Ambiental, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS),  
como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Mestre em Engenharia Civil**

**Orientadora: Profª. Drª. Eloiza Maria Cauduro Dias de Paiva**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2008**

**Universidade Federal de Santa Maria  
Centro de Tecnologia  
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,  
aprova a Dissertação de Mestrado

**ACUMULAÇÃO E TRANSPORTE DE SEDIMENTOS NA  
MICRODRENAGEM: MONITORAMENTO E MODELAGEM**

elaborada por  
**Ana Paula Gomes**

como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Mestre em Engenharia Civil**

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

---

**Eloiza Maria Cauduro Dias de Paiva, Dr<sup>a</sup>.**  
**(Presidente/Orientadora)**

---

**Adilson Pinheiro, Dr. (FURB)**

---

**João Batista Dias de Paiva, Dr. (UFSM)**

Santa Maria, 22 de abril de 2008.

## AGRADECIMENTOS

À Deus.

Aos meus pais, Antonio Carlos Gomes e Sonia Maria de Souza Gomes, e meus queridos irmãos, Daniel e Alessandro, pelo amor, incentivo e compreensão em todos os momentos. A minha cunhada Cátia Simone Brião pela amizade e incentivo nas horas difíceis.

Ao meu namorado e grande incentivador Marcio Machado por todo apoio, dedicação e amor.

A professora Eloiza Maria Cauduro Dias de Paiva pela oportunidade, orientação e pelo exemplo profissional.

Ao professor João Batista Dias de Paiva pela amizade e companheirismo no decorrer do trabalho.

A amiga e colega de mestrado Ana Roberta Victoria Silva pela paciência e auxílio nos trabalhos de campo e laboratório.

A colega Cíntia Brum Siqueira Dotto pela amizade e esclarecimentos nos trabalhos teóricos.

Aos colegas de mestrado e em especial a amiga Lilia Mayumi Kaneda Seeger., Raquel Paula Lorensi e Ana Lúcia Denardin da Rosa pela amizade e companheirismo no decorrer do trabalho.

Aos funcionários José Astério, Eliomar Pappis e em especial ao amigo Alcides Satori pela amizade e auxílio nos trabalhos de campo.

Ao bolsista de iniciação científica Luciano Faustino da Silva pela amizade e auxílio nos trabalhos de campo e laboratório.

Aos colegas Rodrigo Domingues e Ricardo Ruwer Patatt pela amizade e auxílio nos trabalhos de campo.

As colegas Débora Bender Gomes, Liane Cassol Cella, Denise Gracieli Schallemberger, Deise Caroline Albiero Marçal e Cristiana Schons pela amizade e auxílio nos trabalhos de laboratório.

À Universidade Federal de Santa Maria, em especial, ao Departamento de Hidráulica e Saneamento, pela infra-estrutura adequada para a realização do trabalho.

Ao grupo GHIDROS pelas instalações e equipamentos utilizados no desenvolvimento deste trabalho e a CAPES pela bolsa de mestrado concedida.

Agradeço a todas aquelas pessoas que de maneira direta ou indireta auxiliaram na realização desse trabalho.

## **RESUMO**

Dissertação de Mestrado  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil  
Universidade Federal de Santa Maria

### **ACUMULAÇÃO E TRANSPORTE DE SEDIMENTOS NA MICRODRENAGEM: MONITORAMENTO E MODELAGEM**

Autor: Ana Paula Gomes  
Orientadora: Eloiza Maria Cauduro Dias de Paiva  
Data e Local da Defesa: Santa Maria, 22 de abril de 2008.

Este trabalho teve o objetivo de contribuir para o entendimento do processo de acumulação e transporte de sedimentos na microdrenagem urbana, através de monitoramento de sedimento seco em sarjetas de rua asfaltada, monitoramento sedimentológico na saída da microdrenagem e utilização do modelo SWMM para auxiliar em uma maior compreensão dos processos envolvidos. As coletas de sedimentos secos foram realizadas na primeira quadra de uma rua asfaltada, a rua Marquês do Herval, situada em uma zona urbana na cidade de Santa Maria, RS, Brasil. A quadra possui 163,26 m de comprimento, 9 m de largura e 0,0531m/m de declividade média. A área de contribuição da microdrenagem possui área de 0,012 Km<sup>2</sup>, onde foram monitorados dados de precipitação, vazão e concentração de sedimentos em suspensão. Foram obtidos nesse estudo quatro sedimentogramas os quais apresentaram valores entre 3,48 a 6205 mg/L. A área em estudo foi discretizada em três subáreas com a finalidade de aplicação do modelo SWMM. O modelo SWMM foi utilizado para avaliar os parâmetros envolvidos na estimativa do escoamento superficial e de sua qualidade em relação a concentração de sedimentos em suspensão. Os resultados obtidos na calibração dos parâmetros em relação ao escoamento superficial apresentaram um coeficiente de correlação médio de 0,87 e erros médios, na vazão de pico e no volume escoado, de 12,45% e 5,30%, respectivamente. Para a simulação da qualidade do escoamento superficial obteve-se coeficiente de correlação médio de 0,87 e erros médios entre os valores calculados e observados de 36%. Os resultados obtidos na calibração dos parâmetros foram satisfatórios, obtendo-se assim uma boa representação dos processos envolvidos na rede de microdrenagem.

## **ABSTRACT**

M.Sc. Dissertation  
Post Graduation Program in Civil Engineering  
Universidade Federal de Santa Maria

### **SEDIMENT ACUMULATION AND TRANSPORT IN THE MICRODRAINAGE: MONITORING AND MODELING.**

Author: Ana Paula Gomes  
Advisor: Eloiza Maria Cauduro Dias de Paiva  
Date and Local: Santa Maria, Abril 22<sup>th</sup>, 2008.

This research aims to present the database collected to evaluate the distribution of sediments found in gutter of asphalted streets, in Santa Maria – Brazil. We collected liquid samples of the pluvial outflow from the study's area to obtain the concentration of sediments in suspension. We used the SWMM model to the quantitative and the qualitative simulation of the outflow in order to evaluate the parameters involved in this process. The dry sediments were collected up to the gutter during five periods and each period spends 30 days. The corpus obtained from the analysis of the sediments' collection indicated that the distribution up to the gutter does not happen uniformly. We also observed that the right side of the street has usually a higher load of sediments than the left side. Some liquid samples were collected during some storm events in order to determine the sediments concentration in suspension due to the microdrainage. The results of this analysis showed values between 3,48 to 6205 mg/l. The answers collected from the SWMM Model have been evaluated by the calibration of rainfall events, aiming to find out the best parameters which represent the phenomenon occurred in the local area of 0,012 km<sup>2</sup>. The modules calibrated and evaluated were the Runoff and Transport Modules. The monitoring consist of two stations, a pluviographic and a fluviographic. The analysis of the land's use has been done by the Ikonos satellites' images with one meter of resolution. In the simulation of the superficial outflow in the study area, we obtain the medium correlation coefficient of 0,87 and medium errors, in the peak flow and in the runoff volume, of 5,3% and 12,45%, respectivaly. To simulate the quality of superficial outflow, it was obtained medium correlation coefficient of 0,87 and medium errors of 36% , among the observed and calculated values. The results of the parameters of calibration have been satisfactory, it has obtained a good representation of the processes involved in the microdrainage system.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Processos em um sistema de drenagem (modificado de Maksimovic, 2001). Fonte Meller (2004).....	20
Figura 3.2 - Fontes de poluentes em área urbana. Fonte Butler & Clark (1995, apud Dotto (2006)).....	22
Figure 3.3 - Equações de formação utilizada em SWMM (fonte: modificado de Huber et.al., 1988).....	24
Figura 3.4 - Acumulação de poluentes ( Sartor & Boyd, 1972, apud James et al. 2003).....	25
Figura 3.5 - acumulação de sólidos na superfície. Fonte: Maksimovic (2001).....	26
Figura 3.6 - Cargas livre e fixa coletadas nas zonas de amostragem. Fonte: Vaze e Chiew (2002).....	30
Figura 3.7 - Cargas livre e fixa coletadas das duas zonas de amostragem da rua Marquês do Herval durante o primeiro período de amostragem. Fonte: Dotto (2006).....	31
Figura 3.8 - Relação entre descarga líquida e a descarga sólida. Fonte: Dotto (2006).....	34
Figura 3.9 - Relação entre os módulos estruturais do SWMM. (Modificado de Huber & Dickinson (1992, apud Garcia 2005).....	39
Figura 4.1- Localização da área de estudo. (Fonte: modificado de Dotto 2006).....	47
Figura 4.2 - Estação pluviográfica Sest Senat. Fonte: Garcia (2005).....	47
Figura 4.3- Planta baixa da calha (a) e obtenção dos dados do registrador de nível (b).....	48
Figura 4.4 - Valores de $K^*$ , $K1^*$ , $n1$ , $n2$ e grau limite de submersão para a calha medidora funcionando em condições de fluxo livre e submerso. Fonte: Alfaro (1974) apud Martins e Paiva (2001).....	49
Figura 4.5 - Amostrador ISCO modelo FR7600. Fonte: Dotto (2006).....	50
Figura 4.6 - Posicionamento da ponteira na saída do sistema de drenagem.....	51
Figura 5.1 - Desenho esquemático com a disposição de amostragem na Rua Marquês do Herval.....	53
Figura 5.2 - Superfície de amostragem isolada por uma moldura de madeira, (a) aspirada e (b) escovada.....	53
Figura 5.3 - Uso do solo.....	57
Figura 5.4 - Área com discretização em três subáreas.....	59
Figura 5.5 - Desenho esquemático do sistema de drenagem.....	59
Figura 5.6 - Boca de lobo representada pelo nó 1 (a) e boca de lobo representadas pelos nó 2 e 3 (b).....	60

Figura 5.7 - Boca de lobo, (a) representada pelo nó 2, (b) representada pelo nó 3 (b).....	60
Figura 7.1 - Carga livre, fixa e total no do primeiro período de coleta.....	65
Figura 7.2 - Cargas livre, fixa e total no segundo período de coleta.....	66
Figura 7.3 - Cargas livre, fixa e total no terceiro período de coleta.....	66
Figura 7.4 - Cargas livre, fixa e total no quarto período de coleta.....	67
Figura 7.5 - Cargas livre, fixa e total no quinto período de coleta.....	67
Figura 7.6 - Carga Total de sedimento do lado direito e esquerdo da rua Marques do Herval.....	68
Figura 7.7 - Carga Total de sedimento do lado direito e esquerdo da rua Marques do Herval.....	69
Figura 7.8 - Carga Total de sedimento do lado direito e esquerdo da rua Marques do Herval.....	69
Figura 7.9 - Efeito da velocidade do vento e precipitação na carga total de sedimentos diária – Primeiro período de monitoramento.....	71
Figura 7.10- Efeito da velocidade do vento e precipitação na carga total de sedimentos diária – Segundo período de monitoramento.....	71
Figura 7.11 - Efeito da velocidade do vento e precipitação na carga total de sedimentos diária – Terceiro período de monitoramento.....	72
Figura 7.12 - Distribuição granulométrica da carga livre referente ao primeiro período de amostragem.....	74
Figura 7.13 - Distribuição granulométrica da carga fixa referente ao primeiro período de amostragem.....	74
Figura 7.14 - Distribuição granulométrica da carga livre referente ao quarto período de amostragem.....	75
Figura 7.15 - Distribuição granulométrica da carga fixa referente ao quarto período de amostragem.....	75
Figura 7.16 – Calibração dos parâmetros M0 e k a partir dos dados observados do lado direito da rua.....	77
Figura 7.17 - Calibração dos parâmetros M0 e k a partir dos dados observados do lado esquerdo da rua.....	78
Figura 7.18 - Verificação da aplicabilidade da equação – lado direito.....	79
Figura 7.19 - Verificação da aplicabilidade da equação – lado esquerdo.....	79
Figura 7.20 - Verificação da aplicabilidade da equação – lado direito.....	80
Figura 7.21 - Verificação da aplicabilidade da equação – lado esquerdo.....	80

Figura 7.22 - Relação entre a descarga sólida calculada e a observada.....	83
Figura 7.23 - Relação entre a descarga líquida e a descarga sólida.....	84
Figura 7.24 - Evento do dia 03 e 04 .10.05.....	85
Figura 7.25 - Evento do dia 23.12.05.....	85
Figura 7.26 - Evento do dia 14.12.06.....	86
Figura 7.27 - Evento do dia 02.08.07.....	86
Figura 7.28 - Evento do dia 18.09.07.....	87
Figura 7.29 - Evento do dia 13 e 14.11.07.....	87
Figura 7.30 - Calibração dos sólidos suspensos para o evento 03 e 04/10/05.....	91
Figura 7.31 - Calibração dos sólidos suspensos para o evento 23/12/05.....	92
Figura 7.32 - Calibração dos sólidos suspensos para o evento 14/12/06.....	92
Figura 7.33 - Calibração dos sólidos suspensos para o evento 02/08/07.....	93
Figura 7.34 - Calibração dos sólidos suspensos para o evento 18/09/07.....	93
Figura 7.35 - Calibração dos sólidos suspensos para o evento 13 e 14/11/07.....	94
Figura 7.36 - Relação entre os valores calibrados e observados.....	96
Figura 7.37 - Simulação contínua entre os dias 21/07/07 a 02/08/07.....	98
Figura 7.38 - Simulação contínua e individual do evento do dia 02/08/07.....	99
Figura 7.39 - Carga a montante e a jusante no conduto 10.....	99
Figura 7.40 - Carga a montante e a jusante no conduto 20.....	100
Figura 7.41 - Carga a montante e a jusante no conduto 30.....	100
Figura 7.42 - Carga a montante e a jusante no conduto 40.....	101
Figura 7.43 - Carga a montante e a jusante no conduto 50.....	101
Figura 7.44 - Influência dos parâmetros de qualidade no módulo Runoff no erro médio.....	104
Figura 7.55 - Influência dos parâmetros de qualidade no módulo Transport no erro médio..	105
Figura B1 - Distribuição granulométrica da carga livre referente ao segundo período de amostragem.....	125
Figura B2 - Distribuição granulométrica da carga fixa referente ao segundo período de amostragem.....	125
Figura B3 - Distribuição granulométrica da carga livre referente ao terceiro período de amostragem.....	126
Figura B4 - Distribuição granulométrica da carga fixa referente ao terceiro período de amostragem.....	126
Figura B5 - Distribuição granulométrica da carga livre referente ao quinto período de amostragem.....	127

Figura B6 - Distribuição granulométrica da carga fixa referente ao quinto período de amostragem.....	127
Figura C1 - apresentação dos módulos Runoff e Transport.....	130
Figura C2 - Caixa para adição de novos módulos.....	131
Figura C3 - Caixa de entrada de dados no módulo Runoff.....	131
Figura C4 - Caixa de entrada de dados no módulo Transport.....	132
Figura C5 - Gráficos de saída do módulo Transport.....	132
Figura D1 - Esquematização das sub-bacias (Fonte: Garcia, 2005 apud Bastos, 2007).....	135
Figura D2 - Representação do reservatório não linear das sub-bacias (Fonte: Garcia, 2005 apud Bastos, 2007).....	136
Figure D3 - Equações de formação utilizada em SWMM (fonte: modificado de Huber et.al., 1988).....	139
Figura D4 - Ilustração da forma de calcula da equação D20. Fonte: James, 2003.....	142
Figura D5 - Diagrama de Shilds. Fonte: James, 2003.....	144

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Acumulação de poluentes em Chicago (fonte: APWA, 1969 apud James 2003).....	24
Tabela 3.2 – Valores calibrados de M0 e k em locais estudados por Deletic et al. (1997 e 2000, apud Dotto, 2006).....	26
Tabela 3.3 – Diâmetro médio (d50) de sedimentos encontrados em áreas urbanas. Fonte: Dotto (2006).....	32
Tabela 5.1 – Dados obtidos para o uso do solo.....	57
Tabela 5.2 – Características das subáreas.....	59
Tabela 5.3 – Características dos condutos.....	59
Tabela 6.1 – Características dos eventos usados nas simulações.....	61
Tabela 6.2 – Granulometria utilizada no módulo Transport para cada evento.....	63
Tabela 7.1 – Diâmetro médio (d50) dos sedimentos secos encontrados na rua Marques do Herval.....	76
Tabela 7.2 – Diâmetro médio (d50) dos sedimentos secos referentes à carga livre e fixa.....	76
Tabela 7.3 – Coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e o erro médio entre as cargas observadas e calculadas para o lado direito e esquerdo da rua.....	81
Tabela 7.4 – Parâmetros obtidos na calibração do modelo para a área em estudo - vazão.....	90
Tabela 7.5 – Parâmetros obtidos na calibração do modelo para a área em estudo - qualidade.....	96
Tabela 7.6 – Simulação continua - carga de sedimentos em suspensão a montante, jusante e depositada.....	102
Tabela 7.7 – Simulação individual - carga de sedimentos em suspensão a montante, jusante e depositada.....	102
Tabela 7.8 – Verificação das equações de descarga sólida e o modelo SWMM.....	102
Tabela A1 – Precipitação e carga de sedimentos – Primeiro período de amostragem em duas zonas.....	116
Tabela A2 – Precipitação e carga de sedimentos – Segundo período de amostragem em duas zonas.....	117
Tabela A3 – Precipitação e carga de sedimentos – Terceiro período de amostragem em três zonas.....	118
Tabela A4 – Precipitação e carga de sedimentos – Quarto período de amostragem em três zonas.....	119

Tabela A5 – Precipitação e carga de sedimentos – Quinto período de amostragem em três zonas.....	120
Tabela A6 – Precipitação e carga de sedimentos – Terceiro período de amostragem Lado Direito e Lado Esquerdo.....	121
Tabela A7 – Precipitação e carga de sedimentos – Quarto período de amostragem Lado Direito e Lado Esquerdo.....	122
Tabela A8 – Precipitação e carga de sedimentos – Quinto período de amostragem Lado Direito e Lado Esquerdo.....	123
Tabela D1 – Classificação superficial da sub-bacia (Huber e Dirkinson et al. 1992).....	135

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

A	Área
CF	carga fixa
CL	carga livre
cm	centímetro
DRYDAY	número de dias secos antecedentes a um evento
$\Delta t$	Passo de tempo (intervalo de tempo)
d50	diâmetros médios
di	Altura de armazenamento em áreas impermeáveis
dp	Altura de armazenamento em áreas permeáveis
EPA	Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos
g/L	grama por litro
g/m <sup>2</sup>	grama por metro quadrado
GHIDROS	Grupo de Pesquisa em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental
h	hora
ha	altura da lâmina da água
I <sub>0</sub>	Infiltração máxima ou inicial
I <sub>b</sub>	Infiltração mínima ou final
k	Coeficiente de decaimento da equação de Horton
K	constante de acumulação
km <sup>2</sup>	kilômetro quadrado
le	Largura do retângulo equivalente
M <sub>0</sub>	a máxima quantidade de sólidos esperados na superfície
m <sup>2</sup>	
mg/L	miligramma por litro
mm	milímetro
m <sup>3</sup> /s	metros cúbico por segundo
MOUSE	Modelling of Urban Sewers
n	Coeficiente de rugosidade de Manning
ni	Coeficiente de rugosidade de Manning áreas impermeáveis
np	Coeficiente de rugosidade de Manning áreas permeáveis
NW	noroeste
P	precipitação

Q	vazão
QFACT(1)	quantidade de sedimentos disponível
QFACT(2)	constante de acumulação
Qs	descarga sólida
Qp	Vazão de pico
R	Coeficiente de correlação
RCOEF	coeficiente de carreamento
s	Segundos
S	Declividade equivalente do conduto
$S_0$	Declividade do perfil longitudinal
SE	Sudoeste
Sf	Declividade da linha de energia
SPG	densidade específica da partícula
SWMM	Storm Water Management Model
Sest Senat	estação pluviométrica
$t'$	período virtual
tdry	duração do período seco antecedente
UFSM	Universidade Federal de Santa Maria
W	Largura da sub-bacia
WASHPO	expoente
$\mu\text{m}$	mícrons
$\gamma_s$	peso específico real dos grãos
$\gamma$	peso específico da água

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	17
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	19
2.1 Objetivo Geral.....	19
2.2 Objetivos Específicos.....	19
<b>3. REVISÃO DA LITERATURA.....</b>	20
3.1. Drenagem urbana (drenagem e qualidade).....	20
3.2. Produção de sedimentos em áreas urbanas ( fontes e importância).....	21
3.3. Acumulação de poluentes em áreas urbanas (“buildup”).....	23
3.4. Carreamento de poluentes em áreas urbanas (“washoff”).....	27
3.5. Estudos relacionados à propagação de sedimentos em superfícies impermeáveis.....	29
3.6. Descarga sólida em suspensão.....	33
3.7. Modelos hidráulicos e hidrológicos.....	34
3.7.1. Equações utilizadas pelos modelos.....	35
3.7.2. Modelos de drenagem urbana.....	36
3.7.3. Aplicações do modelo SWMM.....	42
<b>4. DESCRIÇÃO DA ÁREA ESTUDADA E MONITORAMENTO</b>	
<b>HIDROSEDIMENTOLÓGICO.....</b>	45
4.1. Localização e descrição da área de estudo.....	45
4.2. Monitoramento pluviométrico.....	46
4.3. Monitoramento fluviométrico.....	47
4.4. Monitoramento sedimentometrico.....	49
<b>5. METODOLOGIA.....</b>	51
5.1. Coletas de sedimentos secos.....	51
5.2. Coletas de sedimentos em suspensão.....	53
5.3. Análises de laboratório.....	53
5.3.1. Análises dos sedimentos secos.....	53
5.3.2. Análises das amostras líquidas.....	54
5.4. Análise da equação proposta por Sartor and Boyd (1972 e 1974) apud Deletic et al. (1997).....	54
5.5. Aplicação da equação de descarga sólida em suspensão proposta por Dotto (2006).....	55
5.6. Análise do uso do solo.....	55

5.7. Discretização da área em estudo.....	56
<b>6. ANALISES DO SISTEMA DE DRENAGEM.....</b>	<b>60</b>
6.1. Aplicação do modelo SWMM – Quantidade.....	61
6.2. Aplicação do modelo SWMM – Qualidade.....	62
6.3. Métodos de calibração do modelo SWMM.....	62
6.4. Análise de sensibilidade.....	63
<b>7. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>64</b>
7.1 Sedimento seco acumulado nas sarjetas.....	64
7.1.1. Resultados do monitoramento.....	64
7.1.2. Efeito da Precipitação e da Velocidade do Vento.....	69
7.1.3. Distribuição Granulométrica dos Sedimentos.....	73
7.1.4. Análise da equação proposta por Sartor & Boyd (1972 e 1974) apud Deletic et al. (1997).....	76
7.1.4.1. Calibração dos parâmetros.....	76
7.1.4.2. Verificação do modelo.....	77
7.2. Monitoramento da descarga sólida em suspensão e equações de ajustes.....	81
7.3. Aplicação SWMM.....	83
7.3.1. Calibração do modelo SWMM – Quantidade.....	83
7.3.2. Calibração do modelo SWMM – Qualidade.....	90
7.3.3. Verificação do modelo SWMM.....	96
7.3.4. Análise de sensibilidade.....	102
7.3.4.1 Sensibilidade dos parâmetros do módulo Runoff.....	103
7.3.4.2 Sensibilidade do parâmetro do módulo Transport.....	104
<b>8. CONCLUSÕES.....</b>	<b>105</b>
<b>9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS.....</b>	<b>108</b>
<b>APÊNDICES .....</b>	<b>113</b>
APÊNDICE A – TABELAS DE COLETA DE SEDIMENTO SECO.....	114
APÊNDICE B – CURVAS GRANULOMÉTRICAS DAS AMOSTRAS DE SEDIMENTO SECO.....	123
<b>ANEXOS.....</b>	<b>127</b>
ANEXO C – JANELAS DE APRESENTAÇÃO DO APLICATIVO PCSWMM 2003.....	128
ANEXO D – EQUACIONAMENTO E PROCEDIMENTOS UTILIZADOS PELOS MÓDULO RUNOFF E TRANSPORT.....	132

## **1. INTRODUÇÃO**

O desenvolvimento urbano produz um aumento na produção de sedimentos e na degradação da qualidade da água superficial e subterrânea. À medida que as cidades se urbanizam, ocorre o aumento das vazões máximas devido à impermeabilização e à canalização, aumentando também, de forma significativa, a produção de sedimentos (Tucci, 1995).

Os efeitos da produção de sedimentos ocasionam vários problemas ao meio ambiente, tais como: obstrução nos sistemas de drenagem, má qualidade da água pluvial, obstrução de bueiros, etc. Além disso, a poluição gerada em áreas urbanas através de abrasão, desgaste das ruas pelos veículos, resíduos orgânicos de pássaros e animais, resíduos domésticos, construção civil, entre outros, são transportados pelo escoamento superficial, o qual carrega o material solto ou solúvel que é encontrado sobre áreas permeáveis e impermeáveis até os corpos receptores (Deletic et al., 2000).

Dessa forma, os sedimentos transportados pela microdrenagem de áreas de alta declividade e de expansão urbana atingem a macrodrenagem e depositam-se em áreas de menor declividade e de capacidade de transporte. Com os sedimentos depositados, a capacidade de escoamento dos canais da macrodrenagem diminui, ocasionando uma maior freqüência de inundações. Ademais, o transporte de sedimentos traz consigo a carga de poluentes presentes no material fino, degradando, dessa maneira, a qualidade da água (Tucci, 2007).

A escolha de métodos e práticas mais adequadas para a avaliação e minimização dos impactos causados pela presença de sedimentos na rede de drenagem e no curso d'água requer a realização de estudos de caracterização, propagação e quantificação dos sedimentos nas áreas urbanas (Dotto, 2006).

Estudos integrados da quantidade e da qualidade das águas pluviais são absolutamente necessários para se gerar conhecimento e desenvolvimento tecnológico adequados para a minimização dos impactos ocasionados no meio ambiente. A modelagem matemática tem se mostrado, nos últimos tempos, uma ferramenta importante para o planejamento, dimensionamento e operação da drenagem urbana.

Através da modelagem da drenagem urbana, é possível verificar-se diversas condições de funcionamento dos sistemas de drenagem e também avaliar as respostas da bacia, auxiliando na avaliação da poluição, no planejamento e gerenciamento do sistema; no controle em tempo real e na análise de interação entre as sub-bacias. (Maksimovic, 2001).

A modelagem dos escoamentos urbanos é complexa em razão de diversos fatores, tais como: diversidade da ocupação urbana, inexistência de cadastramento atualizado da rede de microdrenagem, interfaces entre o escoamento da superfície e escoamentos em redes de canais subterrâneos de drenagem, mudanças sucessivas de regimes de escoamento, presença de resíduos sólidos e de sedimentos no escoamento. O aperfeiçoamento de técnicas de modelagem e esforços para a quantificação e a redução de incertezas nesse campo constitui-se, portanto, em elementos relevantes de desenvolvimento tecnológico (Nascimento, 2003).

Vale ressaltar que Dotto (2006) investigou a quantificação de sedimentos provenientes de superfícies impermeáveis, em Santa Maria, no Rio Grande do Sul. A quantificação foi realizada em períodos secos sobre superfícies asfaltadas e monitoramento hidrossedimentológico em períodos úmidos da área de contribuição investigada. Os resultados, deste estudo, mostraram que a carga total de sedimentos secos encontrados em superfícies impermeáveis e a quantidade de sedimentos em suspensão transportados pelo escoamento superficial são muito variáveis.

Este trabalho é uma continuação dos estudos realizados por Dotto (2006), com a finalidade de se ter uma maior representação do processo de acumulação e propagação dos sedimentos provenientes de superfícies impermeáveis. Foi dada continuidade ao monitoramento hidrossedimentológico nos períodos secos e chuvosos, aplicadas novas metodologias de coleta dos sedimentos secos e utilizado o modelo SWMM para a simulação das informações observadas.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo Geral:**

Este trabalho tem por objetivo contribuir para o entendimento do processo de acumulação e transporte de sedimentos na rede de microdrenagem. Para atingir o objetivo, foram realizados: monitoramento de sedimento seco nas sarjetas de rua asfaltada, levantados sedimentogramas de cheia na saída da microdrenagem e utilizado o modelo SWMM para uma compreensão dos processos envolvidos.

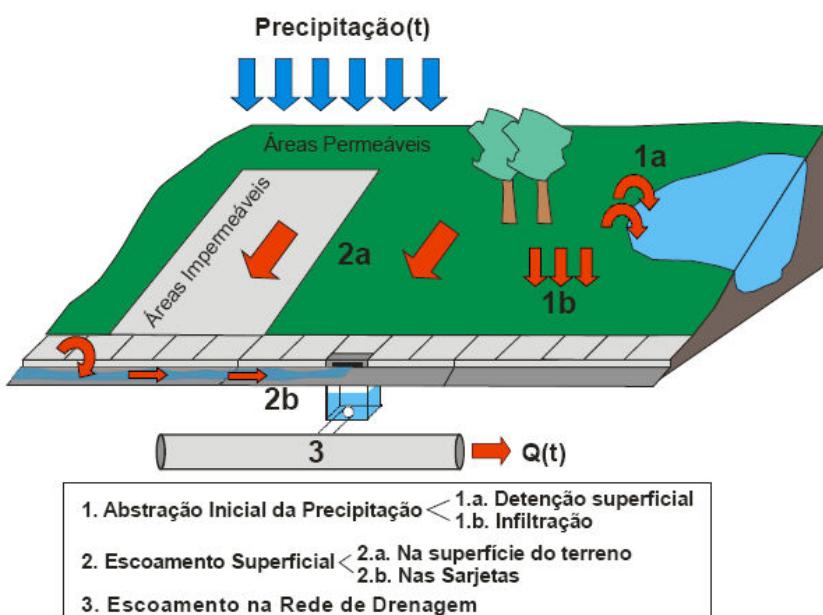
### **2.2 Objetivos Específicos:**

- \_\_ Quantificação da deposição de sedimento seco na sarjeta de rua asfaltada;
- \_\_ Monitoramento hidrossedimentológico na canalização coletora do escoamento pluvial, que drena a área de onde foi analisado o sedimento seco;
- \_\_ Verificação e aplicabilidade de equações empíricas de acumulação de sedimentos em sarjetas;
- \_\_ Verificação e elaboração de equações empíricas de descarga sólida;
- \_\_ Calibração do modelo SWMM para área em estudo;
- \_\_ Verificação do modelo SWMM para área em estudo;
- \_\_ Análise de sensibilidade do modelo SWMM.

### 3. REVISÃO DA LITERATURA

#### 3.1 Drenagem Urbana

Qualquer tipo de superfície, incluindo áreas residenciais, comerciais e industriais, ruas e rodovias, que não tenha possibilidade de infiltração ou de armazenamento durante os eventos de precipitação, acabam gerando uma série de fontes, que contribuem para a geração do escoamento em áreas urbanas. Quando se modifica uma área de um ecossistema natural para uma área urbana, a superfície passa a ser ocupada por sarjetas, ruas e estacionamentos, alterando, de forma significativa, todo o sistema natural. (EPA, 1999). Assim, a água que antes era infiltrada e alcançava o lençol freático, sendo utilizada pelas plantas e evaporada e transpirada para atmosfera, é agora transformada diretamente em escoamento superficial. A figura 3.1 mostra os principais processos que ocorrem em um sistema de drenagem.



**Figura 3.1 - Processos em um sistema de drenagem (modificado de Maksimovic, 2001). Fonte Meller (2004)**

As redes de drenagem urbana são responsáveis pela veiculação de cargas poluidoras, constituindo-se em um importante fator de degradação de rios, lagos e estuários (PORTO, 1995). Essa poluição difusa é gerada pelo escoamento superficial em áreas urbanas, proveniente da deposição de poluentes, de maneira esparsa, sobre a área contribuinte da bacia hidrográfica.

A poluição das águas pluviais, segundo Tucci (2007), pode ocorrer pela absorção de poluentes aéreos, lavagem de superfícies urbanas, acumulação de poluentes em sistemas de escoamento ou qualquer tipo de sistema de condução e lavagem de depósitos de conteúdos contaminados. Fatores esses que dependem do tipo de superfície e dos materiais depositados que podem ser sedimentos, nutrientes, metais pesados, matéria orgânica, organismos patogênicos e hidrocarbonetos de petróleo. Desse modo, a qualidade da água pluvial depende de vários fatores como limpeza urbana, intensidade de precipitação e sua distribuição temporal e espacial, da época do ano e do tipo de uso da área urbana.

Ainda nesse enfoque, Tucci (1995) ressalta que vários resultados demonstrados na literatura têm apresentado que a qualidade de água pluvial pode ser inferior que a do efluente de um tratamento secundário e que, em geral, a quantidade de sedimentos suspensos na drenagem pluvial é muito superior à encontrada no esgoto “*in natura*”.

### **3.2 Produção de Sedimentos em Áreas Urbanas**

A produção de sedimentos, em áreas urbanas, engloba dois conceitos básicos: primeiro, que haja disponibilidade de material suscetível de ser transportado e, segundo, que o escoamento tenha capacidade para transportar esse material (Branco, et al. 1998).

Segundo Tucci (2004), no desenvolvimento urbano são observados três estágios distintos da produção de material sólido na drenagem urbana: o inicial, o intermediário e o final. O estágio inicial ocorre quando a cobertura da bacia é modificada pela retirada da proteção natural, deixando o solo desprotegido e propiciando uma maior erosão em períodos chuvosos. Em áreas urbanas isso pode ocorrer, por exemplo, em áreas de grandes construções ou na fase de implementação de loteamentos, onde ocorre grande movimentação de terra, que é transportada pelo escoamento superficial. No estágio intermediário, há uma movimentação de terra devido ao surgimento de novas construções, mas, parte da produção de terra está estabelecida. Já no estágio final, as superfícies urbanas estão estabilizadas, restando apenas produção de resíduos sólidos urbano com apenas algumas parcelas de sedimentos em áreas de construção.

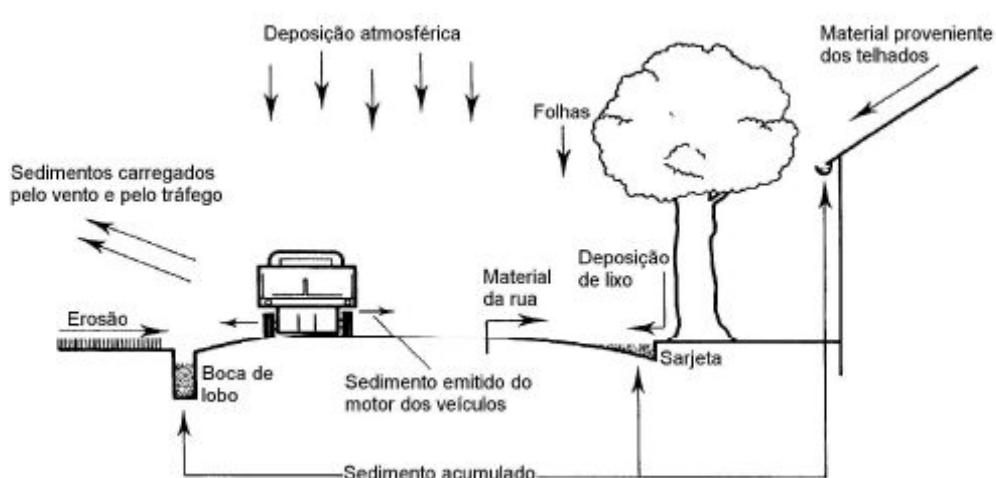
Sendo assim, para se avaliar os impactos gerados pela carga difusa, é preciso que se identifiquem as fontes geradoras do material transportado pelo escoamento superficial. As principais fontes geradoras da carga difusa são: deposição atmosférica, desgaste da pavimentação, veículos, restos de vegetação, resíduos sólidos e poeira, restos de dejetos de animais, derramamentos e erosão (USEPA, 1977 apud Tucci 1995).

Logo, a deposição atmosférica ocorre devido à deposição de poluentes em superfícies urbanas, chamada de “deposição seca”, que, em eventos chuvosos, a água “lava” essas superfícies, transportando os poluentes até os corpos d’água. A deposição de poluentes nas ruas ocorre devido ao acúmulo de resíduos deixados pelos veículos, por restos de vegetação, partículas de solo como areia e argila, desgaste do pavimento, dejetos de animais e lixo (Novotny, Chesters, 1981 apud Tucci 1995).

Conforme Butler & Clark (1995, apud Dotto 2006), o material depositado ao longo de uma rua é muito assimétrico, sendo que a 15 cm da guia (sarjeta) podem ser encontrados 80 % dos poluentes contidos na rua.

Assim, o tráfego de veículos contribui de forma significativa nos impactos gerados pela carga difusa como derrame de combustível, óleo lubrificante, fluido de freio, líquido refrigerante, partículas que se soltam com o desgaste de pneus e freios, além de ferrugem, partículas de tinta, entre outros. Devido a esses derrames de combustíveis ou lubrificantes e as condições meteorológicas, a superfície pavimentada sofre desgaste, soltando pedaços de asfalto, partículas de cimento e de outros materiais utilizados na pavimentação. Ademais, o lixo é outra fonte de poluição difusa que acarreta danos significativos por transportar matéria orgânica, bactérias e obstruir canalizações. A quantidade de lixo encontrado nas ruas depende da densidade de ocupação da área, do movimento de pedestres e veículos e, principalmente, da educação da população (Tucci, 1995).

A figura 3.2 apresenta uma ilustração das fontes de sedimentos em ambiente urbano.



**Figura 3.2 - Fontes de poluentes em área urbana. Fonte Butler & Clark (1995, apud Dotto (2006)).**

Dessa forma, o sedimento transportado pelo escoamento superficial proporciona prejuízos no local de origem, no trecho onde transitam e no local em que se depositam (MEYER & SHEN, 1971), prejuízos esses que dependem da quantidade e da natureza dos sedimentos e dos processos de produção, transporte e deposição (PAIVA & VILLELA, 1995).

Com o excesso de sedimentos, tem-se: assoreamento, modificação das características hidráulicas do corpo d'água, mudanças na fauna e na flora aquática e deterioração dos aspectos estéticos do corpo d'água. Dessa maneira, o sedimento transportado pelo escoamento superficial causa diversos problemas como diminuição da capacidade escoada, destruição de habitat e diminuição e alteração dos organismos que vivem junto ao fundo (Tucci, 1995).

Segundo Carvalho et al. (2000, p. 14), “os sedimentos não são somente um dos maiores poluentes da água, mas também servem como catalisadores, carreados e como agentes fixadores para outros agentes poluidores. O sedimento, sozinho, degrada a qualidade da água para consumo humano, para recreação, para o consumo industrial, infra-estruturas hidroelétricas e vida aquática. Adicionalmente, produtos químicos e resíduos sólidos são assimilados sobre e dentro das partículas de sedimento. Trocas iônicas podem ocorrer entre o soluto e o sedimento. Dessa forma, as partículas de sedimento agem como um potencializador dos problemas causados por pesticidas, agentes químicos decorrentes dos resíduos sólidos, resíduos tóxicos, nutrientes, organismos patogênicos, etc”.

### **3.3 Acumulação de poluentes em áreas urbanas (buildup)**

Duncan (2003, apud Dotto 2006) concluiu que a acumulação de sedimentos em superfícies impermeáveis pode ser descrita por um processo de equilíbrio dinâmico, ocorrendo entre a acumulação e o carreamento em um ponto e entre as áreas de contribuição ou não.

A acumulação de poluentes em superfícies urbanas pode ser representada por diferentes tipos de funções. Ammon (1979, apud Chen & Adams 2007) sugeriu 4 formas de funções de acumulação, sendo elas: linear, potência, exponencial e Michaelis-Menton. Na figura 3.3 é apresentado um gráfico com as quatro funções.

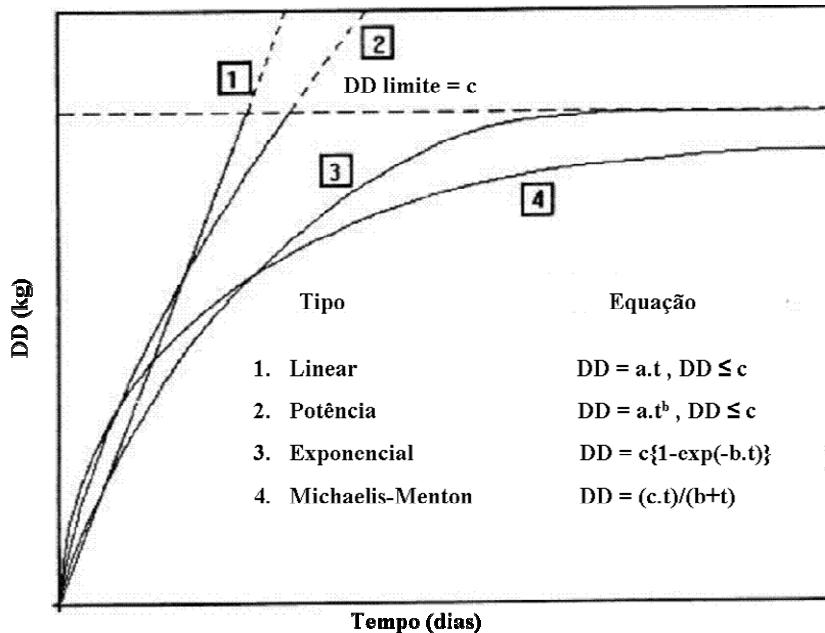


Figure 3.3 - Equações de formação utilizada em SWMM (fonte: modificado de Huber et.al., 1988).

Onde:

$DD$  limite =  $c$  = máxima quantidade de sólidos esperados na superfície, (Kg);

$DD$  = quantidade de sólidos encontrados na superfície, (Kg);

$a$  = quantidade inicial de sólidos na superfície, (Kg/Km<sup>2</sup>);

$t$  = tempo, (dias);

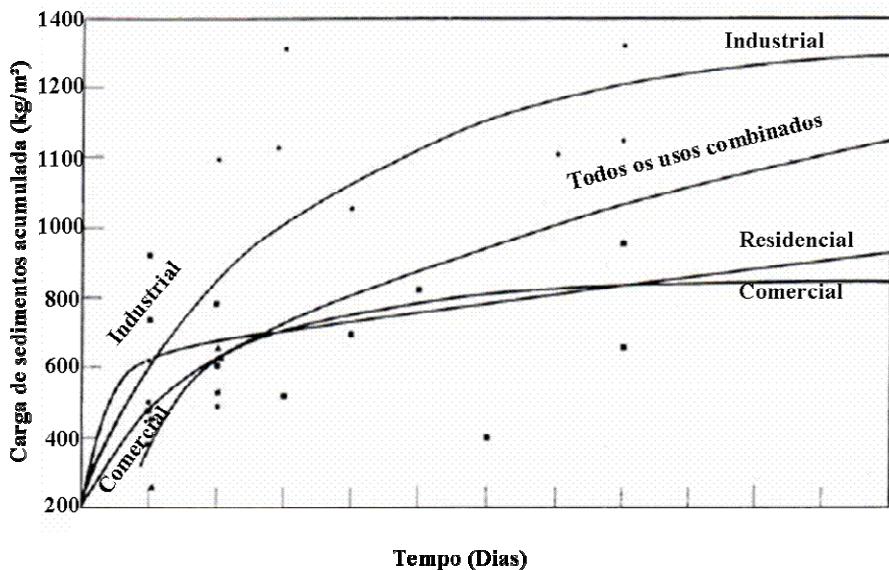
$b$  = constante de acumulação, (dia<sup>-1</sup>).

Em estudos realizados em Chicago pela Associação de Trabalhos Públicos Americana (APWA), a acumulação de poluentes foi medida em diferentes usos do solo e comprimentos de sarjetas com o auxílio de escovas e aspiradores de pó, sendo esses dados normalizados em termos de libras de poluente por dia a cada 100 pés de sarjeta. Estes dados são apresentados na tabela 3.1. O efeito de acumulação do sedimento observado pelos autores foi linear.

Tabela 3.1 - Acumulação de poluentes em Chicago (fonte: APWA, 1969 apud James 2003).

Tipo	Uso	DD/100ft.dia
1	Uni-Familiar	0,7
2	Multi-Familiar	2,3
3	Comercial	3,3
4	Industrial	4,6
5	Pouco Desenvolvido	1,5

Uma formação linear nem sempre descreve o processo de acumulação de poluentes real em áreas urbanas. A não linearidade da formação de poluentes foi verificada por Sartor & Boyd (1972) apud James et al (2003) para diferentes usos do solo, de acordo com a figura 3.4.



**Figura 3.4 - Acumulação de sólidos. Fonte: modificado de Sartor & Boyd (1972) apud James et al. (2003).**

No entanto, Sartor & Boyd (1972 e 1974) apud Deletic et al. (1997) sugeriram uma acumulação de sedimentos do tipo exponencial entre a quantidade de sólidos disponível na superfície e a duração do período seco antecedente, segundo a equação 3.1.

$$M(T) = M_0(1 - e^{-k(t_{dry} + t')}) \quad (3.1)$$

onde:

M = quantidade de sólidos na superfície (g/m<sup>2</sup>),

T = período decorrente desde o início da primeira chuva da série (dia),

t<sub>dry</sub> = duração do período seco antecedente,

t' = período virtual (dia),

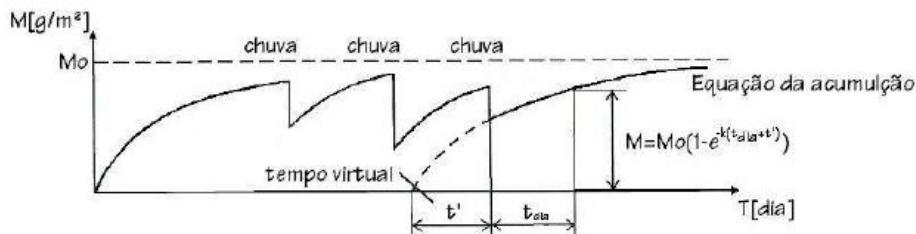
M<sub>0</sub> = a máxima quantidade de sólidos esperados na superfície (g/m<sup>2</sup>),

k = constante de acumulação (dia<sup>-1</sup>).

Há dois parâmetros de ajuste a serem determinados na equação 3.1, M<sub>0</sub> e k que devem ser determinados para cada local.

O período virtual,  $t'$  é utilizado para auxiliar na aplicação da relação exponencial para uma série de precipitações e é calculado assumindo que a deposição é zero em  $t'$  dias antes do começo da chuva antecedente.

A figura 3.5 apresenta a acumulação dos sólidos na superfície, conforme equação 3.1.



**Figura 3.5 – acumulação de sólidos na superfície. Fonte: Maksimovic (2001).**

Depois disso, esse conceito foi empregado amplamente em muitos outros estudos, por exemplo: Charbeneau and Barrett (1998), James et al (2003), Huber (1988), Alley (1981), Alley & Smith (1981) e Dotto et al. (2006).

A tabela 3.2 apresenta valores encontrados para  $M_0$  e  $k$  para locais de superfícies asfálticas com diferentes usos do solo.

**Tabela 3.2 – Valores calibrados de  $M_0$  e  $k$  em locais estudados por Deletic et al. (1997 e 2000) e Dotto (2006). Fonte: modificado de Dotto (2006).**

Local	Fonte	Uso do solo	$M_0$ (g/m <sup>2</sup> )	$K$ (dia-1)
Beechwood, Dundee, Escócia	Deletic et al., 2000	Residencial, estacionamento	27	0,015
Commercial Street, Dundee, Escócia	Deletic et al., 2000	Rua com tráfego intenso	100	0,100
Miljakovac-Belgrado, Sérvia	Deletic et al., 1997	Rua com tráfego médio	10	0,045
Lund, Suécia	Deletic et al., 1997	Estacionamento	18	0,015

Assim, a forma dessa função de acumulação supõe que o poluente acumulado na superfície era completamente lavado durante o último evento de precipitação, ou seja, não há nenhuma quantidade residual do poluente disponível após o evento de precipitação. Alley & Smith (1981) deram ênfase a isso, determinando que a taxa de acumulação de poluentes tem uma influência em relação à quantidade residual de poluentes que permanece na superfície após um evento de precipitação ou limpeza urbana. Desse modo, a quantidade de massa de poluentes acumuladas na superfície pode incluir duas partes: uma parte, sendo a formação de poluentes acumulada durante o período seco; e, a outra parte é a massa de poluente residual não lavada durante o último evento. De acordo com o estudo de Osuch-Pajdzinska & Zawilski

(1998, apud Chen & Adams, 2006), a mudança da taxa de acumulação de poluentes pode ser expressa como:

$$M_b = \frac{(1-h)m_d\beta_1 + hm_w\beta_2\eta}{k_b} (1 - e^{-k_b b}) + M_0 e^{-k_b b} \quad (3.2)$$

onde:

$M_b$  = quantidade de poluente na superfície ( $\text{Kg/m}^2$ );

$h$  = fração de área impermeável;

$m_d$  = taxa constante de poluente depositada ( $\text{Kg/m}^2\text{h}$ );

$m_w$  = quantidade de poluente varrido da rua ( $\text{Kg/m}^2\text{h}$ );

$\beta_1$  = parâmetro de conversão da massa de partículas em suspensão em um parâmetro de um determinado tipo de poluente

$\beta_2$  = parâmetro de conversão da massa de partículas varridas em um parâmetro de uma determinado tipo de poluente;

$\eta$  = parâmetro de eficiência de remoção da rua;

$k_b$  = taxa de remoção dos poluentes ( $\text{h}^{-1}$ );

$b$  = duração do período seco antecedente (h);

$M_0$  = quantidade residual de poluente ( $\text{Kg/m}^2$ ).

Nessa equação há quatro parâmetros de ajuste,  $M_0$ ,  $\beta_1$ ,  $\beta_2$  e  $k_b$  que devem ser determinados para cada local e tipo de poluente. A equação 3.2 foi adotada em vários outros estudos para representar o processo de formação dos poluentes em ambiente urbano, tais como: Sartor & Boyd 1974, Novotny et al. 1985, Osuch-Pajdzinska & Zawilski 1998, Zhang & Yamada 1996, apud Chen & Adams 2007).

### 3.4 Carreamento de poluentes em áreas urbanas (washoff)

O processo de transporte ocorre pela remoção dos poluentes acumulados nas superfícies impermeáveis pelo escoamento superficial, processo esse que depende da intensidade da chuva.

Segundo Graf(1971) e Vanoni (1975) apud James (2003), o carreamento de poluentes sobre uma superfície, seja ela impermeável ou permeável, se dá por um processo de erosão durante um período de chuva. Esse processo de erosão pode ser descrito pela teoria de transporte de sedimentos, na qual a taxa do fluxo da massa de sedimentos é proporcional a

tensão de cisalhamento do fundo e o início do movimento de uma partícula é determinado por uma tensão de cisalhamento crítica. Porém, o escoamento superficial, dependendo da intensidade da chuva, pode ocasionar um desprendimento das partículas colocando-as em movimento, sendo esse um processo freqüentemente medido por métodos de erosão em áreas permeáveis, que pode também ser aplicado em áreas impermeáveis, sendo que, nesse caso, deve ser considerado o modo de formação desses poluentes.

Vaze & Chiew (2003) estudaram o modo de transporte de poluentes em superfícies impermeáveis e mostraram que a energia das gotas de chuva era importante no começo do evento, quando as concentrações desses poluentes eram maiores.

Em 1974, foi sugerida uma equação para o carreamento dos poluentes de autoria desconhecida, encontrada nos relatórios do corpo do exército de engenheiros do distrito de Boston, sendo hoje utilizada pelo modelo SWMM para calcular a quantidade de poluentes lavada da superfície, conforme a fórmula 3.6 ( James et al., 2003).

$$POFF(t) = -\frac{dPSHED}{dt} = -RCOEFX.r^{WASHPO}.PSHED \quad (3.3)$$

onde:

POFF = quantidade de poluente lavado na superfície no tempo t, (mg/sec);

PSHED =quantidade de poluentes disponível na superfície no tempo t, (mg);

RCOEFX = RCOEF/3600 = coeficiente de carreamento de poluentes, (mm/h)<sup>-WASHPO</sup>.sec<sup>-1</sup>;

WASHPO = expoente;

r = intensidade de chuva, (mm/h).

Chen & Admas (2006), em um estudo consideraram a taxa de carreamento de poluentes proporcional à quantidade de formação dos poluentes e ao volume escoado, segundo a equação 3.7.

$$M_w = M_b(1 - e^{-k_w v_r}) \quad (3.4)$$

onde:

M<sub>w</sub> = quantidade de poluente carreado na superfície, (Kg/m<sup>2</sup>);

M<sub>b</sub> = quantidade de poluente na superfície, (Kg/m<sup>2</sup>);

$k_w$  = coeficiente de decaimento, ( $\text{mm}^{-1}$ );  
 $v_r$  = intensidade de chuva.

Além disso, Sartor & Boyd (1972, apud James 2003) apresentaram uma relação exponencial para que pudesse ser utilizada para descrever o processo de transporte dos poluentes em áreas urbanas na forma:

$$POFF(t) = PSHED_0(1 - e^{-kt}) \quad (3.5)$$

onde:

POFF (t) = quantidade de sólidos carreados da superfície, (mg/s),

$PSHED_0$  = quantidade inicial de sólidos na superfície, (mg),

$k$  = coeficiente de carreamento ( $\text{dia}^{-1}$ ),

$t$  = tempo (dia).

Deletic (1997) demonstrou que a carga de sedimentos suspensos estava fortemente relacionada com o volume escoado. Ademais, uma série de outros estudos mostraram também que a carga de poluentes carreados poderia ser melhor estimada utilizando o volume escoado ao invés da vazão escoada, exemplo Charbeneau & Barrett (1998).

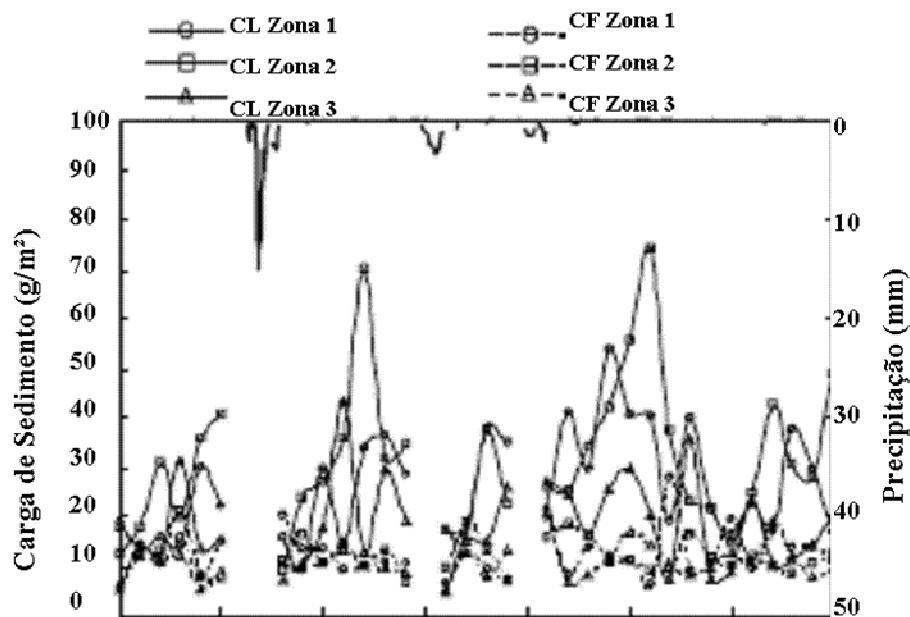
### 3.5 Estudos quantitativos e qualitativos de sedimentos em superfícies impermeáveis.

Vaze & Chiew (2002) criaram e aplicaram uma metodologia apresentando resultados de uma pesquisa de campo, realizada para analisar a acumulação de poluentes em uma rodovia urbana, em Melbourne, na Austrália. A pesquisa investigou a variabilidade da carga de poluentes em uma rodovia urbana, a partir de dados coletados durante um período de 36 dias. As análises foram feitas através de amostragem de sedimentos secos, coletados diretamente da rodovia, e de amostras líquidas, provenientes do escoamento superficial.

Com a finalidade de se obter uma amostra representativa, a rodovia foi dividida em três zonas, onde em cada uma das zonas era feita a coleta através de um aspirador de pó. Dois tipos de cargas de poluentes foram coletados. Primeiro, a superfície da rua foi aspirada sem nenhum processo prévio de preparação e a carga coletada foi definida como carga livre. Em seguida, a mesma superfície foi escovada utilizando-se uma escova de fibra para que, então,

os poluentes finos agregados à superfície fossem soltos. Esta segunda coleta foi caracterizada como carga fixa.

A figura 3.6 apresenta as cargas de sedimentos secos encontradas nas zonas de amostragem por Vaze & Chiew (2002).



**Figura 3.6 - Cargas livre e fixa coletadas nas zonas de amostragem. Fonte: Vaze & Chiew (2002).**

Onde:

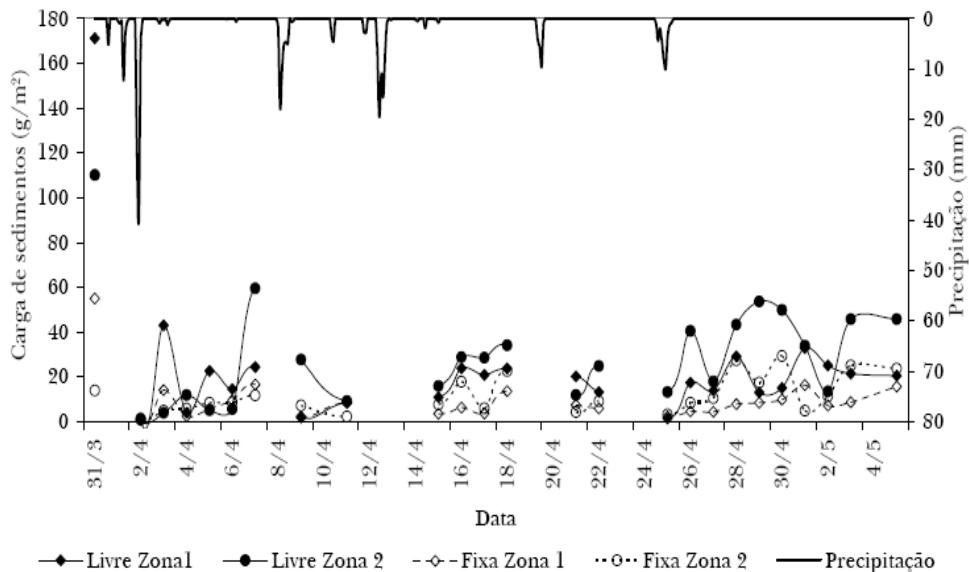
- CL Zona 1 = Carga livre encontrada na zona 1;
- CL Zona 2 = Carga livre encontrada na zona 2;
- CL Zona 3 = Carga livre encontrada na zona 3;
- CF Zona 1 = Carga fixa encontrada na zona 1;
- CF Zona 2 = Carga fixa encontrada na zona 2;
- CF Zona 3 = Carga fixa encontrada na zona 3;

Através das amostras líquidas, provenientes do escoamento superficial, foram analisadas as concentrações de nitrogênio, que apresentaram valores entre 0,1 e 4,0 mg/L, e as de fósforo, que apresentaram valores entre 1,0 e 20,3 mg/L.

Essa mesma metodologia foi aplicada por Dotto (2007) em Santa Maria, no Rio Grande do Sul. Este estudo investigou a quantificação de sedimentos provenientes de duas ruas asfaltadas, a partir de amostras secas coletadas ao longo da superfície e investigou também a carga de sedimentos em suspensão, proveniente do escoamento superficial em uma das ruas, a rua Marques do Herval. Com o objetivo de se ter uma amostra representativa, a rua foi dividida em duas zonas, sendo aspirada uma superfície de 0,5 m<sup>2</sup> em cada uma das zonas

através de um aspirador de pó. Dois tipos de cargas de poluentes foram coletadas, conforme definição e procedimentos adotado por Vaze & Chiew em 2002, carga livre e fixa.

A figura 3.7 apresenta as cargas encontradas por Dotto (2007) nas zonas de amostragem em uma das ruas coletadas.



**Figura 3.7 – Cargas livre e fixa coletadas das duas zonas de amostragem da rua Marquês do Herval durante o primeiro período de amostragem. Fonte: Dotto (2007).**

Onde:

Livre Zona 1 = Carga livre encontrada na zona 1;

Livre Zona 2 = Carga livre encontrada na zona 2;

Fixa Zona 1 = Carga fixa encontrada na zona 1;

Fixa Zona 2 = Carga fixa encontrada na zona 2;

Os valores encontrados para a concentração de sedimentos em suspensão variaram entre 8,0 a 6000 mg/L e apresentou um valor médio de 537,05 mg/L.

O efeito da precipitação foi analisado em ambos estudos, mostrando que a carga total de sedimentos na sarjeta diminuía após a maioria dos eventos de precipitação. Os resultados demonstraram também que, dependendo da intensidade e da duração de cada evento de precipitação, parte dos sedimentos presentes na superfície pode se desagregar ou se dissolver e que, no entanto, pequenos eventos de precipitação desagregam principalmente a carga livre, enquanto que eventos maiores podem desintegrar também a carga fixa. Os autores apresentaram também o efeito da chuva na distribuição granulométrica dos poluentes. As análises indicaram que quase toda carga livre é mais fina que 3000 µm e que a carga fixa é muito mais fina que a carga livre. Assim, quase toda a carga fixa é mais fina que 1000 µm.

Os resultados encontrados por Dotto (2007) apresentaram um comportamento semelhante aos obtidos por Vaze & Chiew (2002), entretanto, as cargas amostradas foram maiores. Foi verificado pelos referidos estudos anteriormente uma grande variação da carga de sedimentos remanescente após os eventos chuvosos devido à grande variabilidade de intensidade e duração da precipitação.

Muthukaruppan et al. (2002) apresentaram um estudo sobre a distribuição granulométrica de sedimento seco encontrados em sarjetas de ruas em Melbourne, Austrália. As coletas foram realizadas ao longo das sarjetas de uma área residencial, com o auxílio de um aspirador de pó. As análises granulométricas apresentaram 5 % das partículas menores que 0,45mm e diâmetro médio (d50) de 0,25mm. A distribuição granulométrica de sedimento carreado pela rede de microdrenagem é um fator importante para o entendimento do processo e desenvolvimento de projetos adequados. A tabela 3.3 apresenta valores de diâmetros médios (d50) encontrados em diversos estudos.

**Tabela 3.3 – Diâmetro médio (d50) de sedimentos encontrados em áreas urbanas. Fonte: Dotto (2006).**

Local de Amostragem	d50 ( $\mu\text{m}$ )
London Borough of Lambeth, Londres, Inglaterra	$\approx 400$
Beechwood, Dundee, Escócia	$\approx 8000$ *
Commercial Street, Dundee, Escócia	$\approx 1600$ *
Melbourne, Austrália	$\approx 250$ **
Bouverie Street, Melbourne, Austrália	$\approx 500$
Marquês do Herval, Santa Maria, RS, Brasil	$\approx 350$
Rigoberto Duarte, Santa Maria, RS, Brasil	$\approx 350$

\* Partículas menores que 63  $\mu\text{m}$  não foram fracionadas.

\*\* Foram fracionadas apenas os sedimentos menores que 1000  $\mu\text{m}$

Menezes e Rosso (2007) avaliaram a qualidade da água pluvial, correlacionando aos poluentes originados pelo tráfego de veículos automotores, para o caso do Túnel Rebouças, localizada na bacia contribuinte da Lagoa Rodrigo de Freitas, no município do Rio de Janeiro, RJ. A pesquisa investigou os seguintes parâmetros: sólidos totais, sólidos suspensos totais, condutividade, pH, alcalinidade total, óleos e graxas, DQO, nitrogênio amoniacal, fósforo total, BTEX, cromo, cádmio, cobre, chumbo, zinco, níquel, ferro e manganês, a partir de dados coletados durante cinco campanhas de amostragem, com intervalo em média de 15 dias. Dois tipos de amostras foram obtidas: a primeira foi obtida através da lavagem de uma superfície de um metro quadrado, demarcada com um quadro metálico dentro do túnel, com 10 litros de água que, posteriormente, foi recolhida com o auxílio de um rodo e uma pá. A segunda amostra foi obtida através de frascos plásticos de 20 litros colocados dentro de

bueiros, localizados nas extremidades do túnel. Os resultados apresentados para sólidos totais (ST) das águas de lavagem de piso foram de 225 mg/L, valor médio, e para as águas pluviais foram de 346 mg/L. Para sólidos em suspensão totais (SST), apresentou um valor médio de 22 mg/L para as águas de lavagem. Foi observado que, em termos gerais, os SST correlacionam-se com os ST e a DQO, indicando que a quantidade de material orgânico depositado na via é aproximadamente igual.

Paz et al. (2004) realizaram uma pesquisa comparando a carga difusa de uma bacia hidrográfica de características rurais com uma bacia próxima em urbanização, situadas em Santa Maria, RS. As concentrações médias de sólidos totais, dos eventos analisados, foram de 250 mg/L e 700 mg/L para bacia rural e urbana, respectivamente.

Conforme Matos et al. (1998), os poluentes mais representativos na drenagem urbana são os sólidos em suspensão, os metais e os hidrocarbonetos. Nesse trabalho, os autores apresentam uma comparação entre valores de zona urbana e rural em que, para sólidos em suspensão, os valores médios foram de 26 mg/L para a zona rural e de 220 mg/L para a zona urbana.

### **3.6 Descarga sólida em suspensão**

O termo descarga sólida se refere à quantidade de sedimentos em movimento. A maior parte da descarga sólida é representada, segundo Carvalho et al. (2000), pelo sedimento em suspensão, chegando a representar 95 % da descarga sólida total. Por esta razão e pela facilidade de determinação, as medições diárias e a maior parte dos eventos individuais só representam o sedimento em suspensão.

Logo, uma maneira de se avaliar a descarga sólida em suspensão é através de medições diretas de vazão líquida e concentração de sedimentos em uma determinada seção.

Dotto (2006) apresentou uma relação, conforme figura 3.8, entre descarga líquida ( $m^3/s$ ) e a descarga sólida (g/s). Esta relação foi elaborada a partir de dados de concentração e vazão medidos durante eventos chuvosos. A equação obtida foi a seguinte:

$$Q_s = 7777,1Q^2 + 999,84Q \quad (3.6)$$

onde:

$$Q = \text{vazão } (m^3/s)$$

$$Q_s = \text{descarga sólida } (g/s)$$

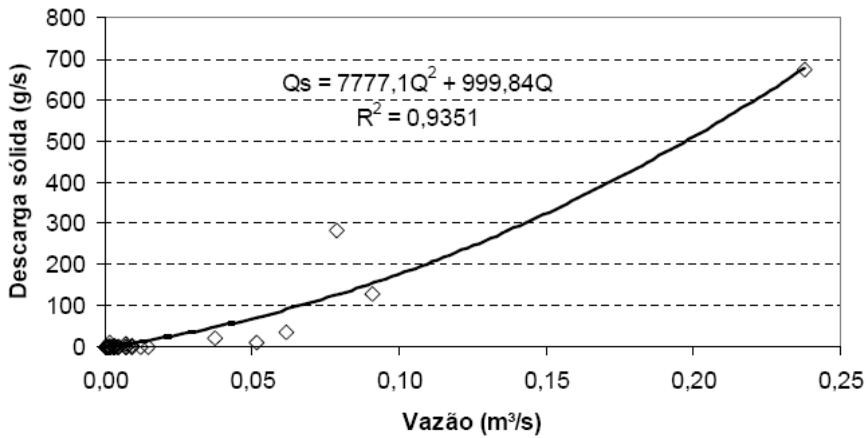


Figura 3.8 – Relação entre descarga líquida e a descarga sólida. Fonte: Dotto (2006).

A equação obteve um bom ajuste, porém, houve uma grande variação nos dados referentes às menores descargas.

### 3.7 Modelos hidráulicos e hidrológicos

Os modelos de drenagem urbana são compostos basicamente por duas partes sequencialmente conectadas: um modelo hidrológico, onde é feita a transformação da precipitação em escoamento superficial, e um modelo hidráulico, para a propagação do escoamento em redes de condutos e canais Meller (2007).

Segundo Garcia (2005), os modelos hidrológicos possuem grande aplicabilidade na representação dos fenômenos naturais que ocorrem em uma bacia hidrográfica. Esses modelos são aqueles em que o efeito da equação da quantidade de movimento é desconsiderado e apenas o armazenamento no escoamento é considerado.

Os modelos hidráulicos utilizam as equações de Saint Venant e podem ser classificados de acordo com suas simplificações. Para o modelo da onda cinemática a simplificação é feita subtraindo os termos de inércia e pressão da equação da quantidade de movimento. Para o modelo de difusão o termo de inércia é omitido na equação de quantidade de movimento.

Os modelos simplificados possuem desvantagens na simulação de algumas condições específicas como, por exemplo, o modelo da onda cinemática onde os efeitos de jusante não podem ser simulados.

### 3.7.1 Equações utilizadas pelos modelos

As equações utilizadas para descrever o escoamento unidimensional em superfície livre baseiam-se nas leis da conservação da massa (equação da continuidade) e da quantidade do movimento baseada na 2º lei de Newton, as chamadas equações de Saint Venant (Meller 2004).

De acordo com Bastos (2007), os modelos que utilizam as equações de Saint Venant são chamados de hidrodinâmicos e podem ser classificados em simplificados ou completos, de acordo com as considerações ou não dos termos da equação da quantidade do movimento.

Os modelos hidrodinâmicos completos utilizam as equações completas de Saint Venant para a propagação do escoamento em canais e redes de condutos. Conforme Garcia (2005), para a solução dessas equações são necessários métodos numéricos baseados em aproximações por diferenças finitas ou elementos finitos. Esses métodos podem ser explícitos ou implícitos.

Os esquemas explícitos caracterizam-se pela necessidade de intervalos de tempo muito pequenos de simulação, devido à sua estabilidade; já os esquemas implícitos possuem condições de estabilidade que podem ser atendidas com intervalos de tempo maiores (James et al., 2003).

As equações da continuidade e da quantidade de movimento são expressas pelas equações 3.8 e 3.9, respectivamente.

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (3.7)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial h}{\partial x} = gA(S_0 - S_1) \quad (3.8)$$

Onde:

$Q$  = descarga, ( $\text{m}^3/\text{s}$ );

$A$  = área malhada, ( $\text{m}^2$ );

$x$  = distância na direção do escoamento (m);

$t$  = tempo, (s);

$g$  = aceleração da gravidade, ( $\text{m/s}^2$ );

$h$  = profundidade, (m);  
 $S_0$  = declividade do perfil longitudinal;  
 $S_f$  = declividade da linha de energia.

A equação da continuidade descreve o balanço da massa no escoamento e a equação da quantidade do movimento descreve o balanço das forças sob condições dinâmicas (Ji, 1998).

O modelo da onda cinemática é obtido da simplificação através da subtração dos termos de inércia e pressão da equação da quantidade de movimento. Logo, as equações que descrevem o modelo onda cinemática são as equações da continuidade e a equação da conservação da quantidade de movimento na forma:

$$S_0 = S_f \quad (3.9)$$

### 3.7.2 Modelos de drenagem urbana

O objetivo deste tópico é apresentar informações gerais de alguns modelos e aplicativos de drenagem urbanas atualmente utilizados. Os modelos citados aqui foram, em sua maioria, desenvolvidos quase que exclusivamente para simulação da propagação em redes de condutos, transformação chuva-vazão e simulação de poluentes transportados pelo escoamento superficial. Pode-se destacar InfoWorks, Mouse, SWMM, Sobek-Urban , entre outros.

#### **Modelo InfoWorks CS (*Wallingford Software*)**

<[http://www.wallingfordsoftware.com/pt/products/infoworks\\_cs/](http://www.wallingfordsoftware.com/pt/products/infoworks_cs/)>

Segundo Meller (2004) o InfoWorks CS é uma ferramenta especialmente desenvolvida para as empresas de saneamento básico, que abrange a modelagem hidrológica de todo o ciclo da água no meio urbano.O modelo possui sua estrutura dividida em 5 módulos principais para estimativa da carga de lavagem, simulação da qualidade da água na rede, construção de hietogramas de projeto, transformação chuva-vazão e propagação na rede de condutos e canais. O módulo chuva-vazão se divide em dois: um para separação do escoamento e outro para propagação na superfície.

A separação do escoamento pode ser feita por seis modelos: Horton, Green - Ampt, Soil Conservation Service (USA) e mais três modelos que utilizam coeficientes baseados nas características da superfície do solo. A propagação superficial do escoamento pode ser feita através de cinco modelos: Double linear reservoir (Reservatório Linear Duplo), Large contributing area (Ampla Área de Contribuição), SPRINT (modelo de base física que simula a estrutura tridimensional da vegetação), Desbordes runoff model (Modelo de cheias no escoamento superficial) e SWMM runoff model. O módulo de propagação do escoamento resolve as equações de Saint Venant em sua forma completa através do esquema implícito de Preissmann, permitindo simular qualquer tipo de rede.

O InfoWorks CS permite a modelagem de sistemas completos, podendo simular modelos com até 100.000 nós. A interferência da deposição de sedimentos no escoamento também pode ser considerada pelo aplicativo, porém, não tem um modelo específico para simulação do transporte de sedimentos na rede.

#### **Modelo Mouse (DHI) <<http://www.dhigroup.com>>**

O modelo MOUSE (Modelling of Urban Sewers), foi desenvolvido em 1984 e 1985 conjuntamente pelo Departamento of Sanitary Engineer da Universidade Técnica da Dinamarca e o Danish Hydraulic Institute (DHI). O aplicativo é organizado em 13 módulos para simulação hidrológica chuva-vazão, propagação do escoamento, da qualidade da água, transporte de sedimentos, simulação de sistemas em tempo real, análise estatística dos dados de saída e ferramentas para apresentação dos resultados. O módulo permite simulação de redes multiplamente conectadas com número ilimitado de nós, canais e condutos com geometrias diversas, inversões de fluxo, escoamento sob pressão, efeitos de jusante, além de estruturas especiais como vertedores, orifícios, operação de conjunto de bombas e bacias de detenção.

Meller (2004) avaliou sistema de drenagem urbana da bacia hidrográfica Alto da Colina, em Santa Maria, RS, através do modelo MOUSE. Nesse estudo, o modelo forneceu bons resultados, permitindo um futuro auxílio no planejamento de drenagem urbana local.

### **Modelo SWMM (*Storm Water Management Model*)**

<<http://www.epa.gov/ednnrnrl/models/swmm/index.html>>

O modelo SWMM ( Storm Water Management Model) foi desenvolvido pela EPA (Environmental Protection Agency), pelos pesquisadores Metcalf e Eddy, a Water Resources Engineers e a Universidade da Flórida.

O modelo é composto por diversos módulos, possibilitando estudos de aspectos de hidrologia urbana e na determinação de ciclos biogeoquímicos associados a qualidade das águas, incluindo precipitação, degelo, escoamento superficial, sub-superficial, escoamento através de redes de drenagem, armazenamento e tratamento ( Hubber e Dickinson, 1992).

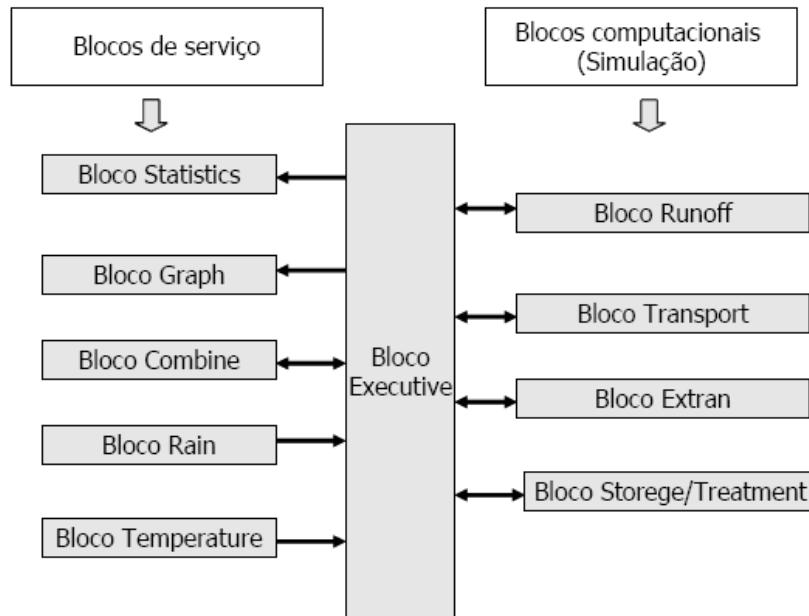
O modelo permite análise quali-quantitativa dos problemas relacionados à drenagem e à investigação de alternativas de controle do escoamento, fornecendo subsídios para estimativas de custo para estruturas de armazenamento e tratamento. As soluções adotadas podem ser avaliadas através de simulações, que fornecem como resultados hidrogramas, polutogramas e cargas de poluentes.

Huber e Dickinson (1992) apresentam a estrutura do modelo em nove blocos ou módulos, sendo quatro computacionais e cinco de serviços, além do módulo executivo. Salientando os módulos computacionais, encontrou-se o módulo Runoff referente à geração do escoamento superficial; o módulo Transport, a propagação na rede de drenagem pelo método da onda cinemática; o módulo Extran, referente à modelação hidrodinâmica em condutos e canais; e o módulo Storage/Treatment, ao tratamento da qualidade das águas.

Os módulos computacionais são os responsáveis pelas principais rotinas de cálculo do aplicativo, como transformação chuva-vazão, propagação na rede, cálculo de cargas poluidoras e simulação de estruturas de controle quali-quantitativa do escoamento, sendo auxiliados pelos módulos de serviço. Os módulos de serviço possuem várias funções como: organização da ordem das simulações (Executive), dados de entrada de precipitação (Rain) e temperatura (Temp), apresentação de dados de saída em forma de gráfico (Graph) e análises estatísticas (Statistics) dos resultados.

No que se refere ao módulo Runoff, esse permite a simulação quali-quantitativa do escoamento gerado em áreas urbanas e sua propagação na superfície ou através de canais de forma simplificada. Em relação à simulação quantitativa do escoamento, o módulo processa suas rotinas com base em dados de precipitação ou neve, simulando degelo, infiltração em áreas permeáveis (modelos de Horton ou Green Ampt), detenção na superfície, escoamento na superfície e em canais, podendo ser utilizado para simulações de eventos isolados ou

contínuos. Na figura 3.9 está representada a estrutura dos módulos do SWMM e a inter-relação entre eles.



**Figura 3.9 - Relação entre os módulos estruturais do SWMM. (Modificado de Huber & Dickinson (1992, apud Garcia 2005).**

A bacia é representada na forma de um conjunto de sub-bacias e canais de propagação interconectados. A área de cada sub-bacia é subdividida em três subáreas: impermeável com armazenamento, permeável com armazenamento e permeável sem armazenamento. O escoamento superficial é obtido através de um reservatório não-linear para cada subárea, representado pela combinação das equações de Manning e da continuidade, resolvidas pelo processo interativo de Newton- Raphson, que podem ser escritas conforme a equação 3.10.

$$\frac{dd}{dt} = i * -\frac{W}{A.n} (d - d_p)^{\frac{5}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad (3.10)$$

Onde:

W = largura representativa da sub-bacia;

n = coeficiente de rugosidade de Manning;

A = área da sub-bacia;

S = declividade da sub-bacia;

d<sub>p</sub> = altura do armazenamento;

$i^*$  = precipitação efetiva;  
 $d$  = profundidade da água no reservatório;  
 $t$  = tempo.

As informações básicas para simulação hidrológica chuva-vazão são, além dos dados de precipitação, área da sub-bacia, largura representativa da sub-bacia, coeficiente de rugosidade de Manning, declividade da sub-bacia, altura do armazenamento em depressões e parâmetros de infiltração.

Para simulação qualitativa do escoamento, o bloco permite até dez componentes de qualidade e até cinco tipos de uso de solo. O processo de acumulação dos poluentes pode ser considerado dependendo do tipo de uso e ocupação do solo ou dependendo do tipo de poluente a ser simulado. O tipo de uso e ocupação do solo pode ser uni - familiar, multi - familiar, comercial, industrial ou pouco desenvolvido. As funções de acumulação dos poluentes podem ser representadas de quatro formas diferentes, sendo elas: linear, potência, exponencial ou Michaelis-Menton, sendo representadas pelas equações. A equação 3.11 e 3.12 representam a função de acumulação do tipo linear e potência.

$$PSHED = QFACT(3).t^{QFACT(2)} \quad (3.11)$$

$$PSHED \leq QFACT(1) \quad (3.12)$$

Onde:

$QFACT(1)$  = máxima quantidade de sólidos esperados na superfície, ( $\text{Kg}/\text{Km}^2$ );

$QFACT(2)$  = expoente = 1 para o caso linear;

$QFACT(3)$  = máxima quantidade de sólidos esperados na superfície, ( $\text{Kg}/\text{Km}^2$ ).( $\text{dia}^{-QFACT(2)}$ );

$t$  = tempo, dia.

A equação 3.13 representa a função de acumulação do tipo exponencial.

$$PSHED = QFACT(1).(1 - e^{-QFACT(2).t}) \quad (3.13)$$

Onde:

QFACT(1) = máxima quantidade de sólidos esperados na superfície, ( $\text{Kg}/\text{Km}^2$ );

QFACT(2) = constante de acumulação, ( $\text{dia}^{-1}$ );

t = tempo, dia.

A equação 3.14 representa a função de acumulação do tipo Michaelis-Menton.

$$PSHED = QFACT(1).t / (QFACT(3) + t) \quad (3.14)$$

Onde:

QFACT(1) = máxima quantidade de sólidos esperados na superfície, ( $\text{Kg}/\text{Km}^2$ );

QFACT(3) = tempo necessário para atingir a formação máxima, dia;

t = tempo, dia.

A concentração de poluentes é obtida dividindo a quantidade de poluentes transportados, ( $\text{mg}/\text{s}$ ), pela vazão, ( $\text{m}^3/\text{s}$ ), conforme equação 3.15.

$$C = \frac{1}{Q} \left( \frac{dPSHED}{dt} \right) = \text{const.} \frac{RCOEF.r.PSHED}{A.r} \quad (3.15)$$

onde:

C = concentração,  $\text{mg}/\text{L}$ ,

Q = A.r = vazão,  $\text{m}^3/\text{s}$ ,

A = área, ha,

r = intensidade de chuva,  $\text{mm}/\text{h}$ ,

RCOEF = coeficiente de carreamento, e

PSHED = quantidade de poluentes disponível para o carreamento.

Quanto ao módulo Transport, esse propaga o escoamento quali-quantitativas em áreas urbanas, através da rede de drenagem, constituída por canais ou condutos. O escoamento é obtido através do modelo onda cinemática que é representado pela equação da continuidade e da conservação da quantidade de movimento. A declividade da linha de energia é calculada pela fórmula de Manning sendo o escoamento calculado pela formula 3.16.

$$Q = (1/n) \cdot A \cdot R^{2/3} \cdot S_0^{1/2} \quad (3.16)$$

Onde:

$n$  = coeficiente de rugosidade de Manning;

$A$  = área da seção transversal;

$R$  = raio hidráulico;

$S_0$  = declividade do perfil longitudinal.

Para a propagação dos poluentes através da rede de drenagem, o módulo realiza suas rotinas através da equação 3.17.

$$\frac{dVC}{dt} = V \frac{dC}{dt} + C \frac{dV}{dt} = Q_i C_i - QC - KVC + L \quad (3.17)$$

Onde:

$C$  = concentração de poluente, massa por volume,

$V$  = volume,  $m^3$ ,

$Q_i$  = vazão a montante,  $m^3/s$ ,

$C_i$  = concentração a montante,  $mg/L$ ,

$Q$  = vazão a jusante,  $m^3/s$ ,

$K$  = coeficiente de decaimento,  $s^{-1}$ , e

$L$  = fonte de poluente, quantidade/tempo.

O processo de transporte e deposição dos poluentes é obtido através do diagrama de Shields, o qual define o início do movimento das partículas através do cálculo do diâmetro crítico que é determinado em relação às condições hidráulicas a cada passo de tempo. Para isso, é necessário informar a distribuição granulométrica do material e a densidade do grão, sendo esta a relação entre o peso específico do grão e do líquido. O módulo permite no máximo quatro tipos de poluentes.

O módulo Extran propaga o escoamento possibilitando a simulação de condutos sob pressão utilizando as equações completas de Saint Venant tendo a vazão e a cota piezométrica como variáveis. A solução se dá através de um esquema explícito adiantado no tempo, segundo o método de Euler modificado. O módulo simula efeitos de jusante, fluxo reverso, fluxo a superfície livre e ou sob pressão. Neste módulo não são simulados parâmetros de qualidade da água.

### 3.7.3 Aplicações do modelo SWMM

Zaghoul (1983) utilizou o modelo SWMM para simulação do escoamento superficial em uma área urbana através dos blocos Runoff e Transport, com a intenção de analisar o nível de discretização aceita na simulação e também a sensibilidade dos parâmetros envolvidos nesse processo.

Uma área hipotética foi considerada de 25 sub-bacias de 4,65 hectares. O hietograma aplicado à bacia foi de forma triangular com uma intensidade de pico de 102,4 mm/h e duração de uma hora.

Os parâmetros analisados foram: parâmetros de infiltração, armazenamento em depressões, declividade do solo, coeficiente de rugosidade de Manning, porcentagem de impermeabilização e largura das sub-bacias, todos pertencentes ao bloco Runoff. Desses parâmetros, os que se mostraram mais sensíveis foram a percentagem de impermeabilização e a largura da sub-bacia.

Para o módulo Transport, os parâmetros analisados foram: comprimento dos canais, o número de canais, a declividade dos canais e o coeficiente de rugosidade dos canais. No entanto, os parâmetros que se mostraram mais sensíveis foram o comprimento dos canais e o coeficiente de rugosidade de Manning.

Para a análise do nível de discretização foi considerada uma bacia hipotética de 260,21 hectares, subdividida em 37, 5 e 1 sub-bacias uniformes.

Os hidrogramas obtidos pela simulação simplificada foram muito parecidos com os hidrogramas da simulação detalhada, entretanto, houve um pequeno aumento na vazão de pico com a diminuição do número de sub-bacias.

Garcia (2005) avaliou o modelo SWMM para a bacia hidrográfica do Arroio Cancela, na cidade de Santa Maria – RS. Nesse estudo, os blocos utilizados para a simulação do escoamento pluvial foram os blocos Runoff e Extran. No trabalho foi feita uma avaliação do processo de urbanização em relação ao escoamento superficial entre os anos de 1980 e 2004, em que foi observado um aumento na vazão de pico e no volume escoado de 109% e 89,8% respectivamente. Foi feita, ainda, uma avaliação do escoamento superficial para um futuro crescimento da área urbana e os resultados demonstraram um crescimento de 60% e 59% para a vazão de pico e o volume escoado, respectivamente. Desse modo, foi visto que há uma necessidade de um planejamento de uso e ocupação do solo em áreas urbanas para que não ocorram inundações nessas áreas.

Choi & Ball (2001) mostraram, em um estudo feito em uma área urbana de 132,7 hectares em Sydney na Austrália, que os parâmetros envolvidos no escoamento superficial, do modelo SWMM, são influenciados por diversos fatores relacionados com as características de cada sub-bacia.

Temprano et. al (2006) apresentaram uma aplicação do modelo SWMM na simulação de poluentes em um sistema de esgoto combinado. O estudo foi realizado na cidade de Santander, no norte da Espanha, em uma área de 56 hectares com 34% impermeabilizada. Os poluentes simulados foram: sólidos suspensos (SS), demanda química de oxigênio (DQO) e nitrogênio de Kjeldahl total (TKN). A forma de como os poluentes se acumulavam na superfície foi considerada de acordo com o tipo de uso e ocupação do solo e de forma exponencial. Temprano et. al (2006) concluíram que a formação de acumulação e carreamento dos poluentes em um sistema de esgoto combinado é influenciado por um grande número de variáveis, sendo que a dinâmica delas ainda não é muito divulgada. Uma justificativa que consideram é que o modelo SWMM não leva em conta algumas peculiaridades desse fenômeno.

Chen & Adams (2006) simularam seis tipos de poluentes, através do bloco Runoff do modelo SWMM, para uma área residencial de 16,1 hectares, localizada na cidade de Toronto, no Canadá. Os poluentes simulados foram: sólidos suspensos, sólidos totais, demanda biológica de oxigênio, demanda química de oxigênio, ferro e polifenóis totais. O tipo de formação considerado para cada poluente foi exponencial. Foi obtido, entre os poluentes, um coeficiente de correlação médio entre os valores calculados e observados de 0,86 a 0,93. A quantidade de poluente disponível na superfície foi de 105 Kg/ha e 1110 Kg/ha para sólidos totais e sólidos suspensos, respectivamente.

Bastos (2007) aplicou o modelo SWMM em duas bacias hidrográficas urbanas: Alto da Colina e Sítio do Tio Pedro, em Santa Maria – RS, com a finalidade de avaliar os parâmetros envolvidos no escoamento pluvial. Para a bacia Alto da Colina, as simulações foram feitas de modo separado: a parte urbana da parte rural. A bacia Sítio do Tio Pedro, com 0,39 Km<sup>2</sup>, foi discretizada em 11 sub-bacias. As bacias Alto da Colina II e Alto da Colina I possuíam 1,44 e 1,89 Km<sup>2</sup>, respectivamente. Os parâmetros que apresentaram sensibilidade foram o de infiltração, no bloco Runoff, e o coeficiente de rugosidade de Manning, no bloco Extran. Foi verificado que o modelo SWMM apresenta problemas de instabilidade em relação a condutos fechados operando com a capacidade máxima, sendo indicado para sistemas de drenagem em que não ocorram inundações.

Através dos trabalhos descritos anteriormente é possível reunir informações de grande interesse, relativas ao processo de quantificação, propagação e modelagem dos sedimentos contidos em ambiente urbano, que acabam chegando aos corpos receptores pelos sistemas de microdrenagem. Neste estudo, se optou em utilizar o modelo SWMM por ser um aplicativo acessível, reconhecido e utilizado para a simulação da drenagem urbana. Constatou-se uma carência de estudos que definam todo o processo de acumulação e carreamento dos sedimentos em superfícies asfálticas com utilização de modelos matemáticos.

## **4. DESCRIÇÃO DA ÁREA ESTUDADA E MONITORAMENTO HIDROSEDIMENTOLÓGICO**

### **4.1 Localização e descrição da área de estudo**

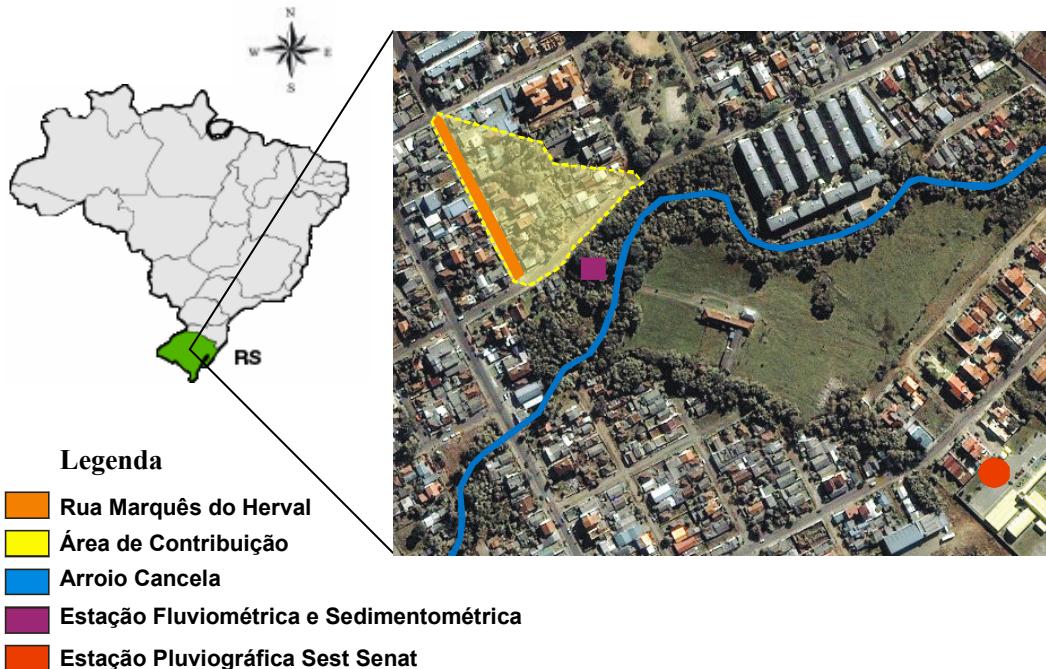
O estudo foi realizado na cidade de Santa Maria. A área de estudo encontra-se inserida na Bacia Hidrográfica do Arroio Cancela, afluente do Arroio Cadena. A bacia é predominantemente urbana e apresenta completa caracterização do uso do solo atual, por Garcia (2005), através de imagem de satélite Ikonos.

Para o desenvolvimento do estudo, a rua selecionada está localizada na porção sudoeste da bacia do Arroio Cancela, a Rua Marquês do Herval, que foi monitorada através da coleta de sedimentos secos ao longo das sarjetas da primeira quadra da rua, monitorada a vazão e os sedimentos em estação fluviográfica e monitorada a precipitação em estação pluviográfica. A rua estudada foi a mesma utilizada por Dotto (2006), onde foi verificada uma grande variação de carga de sedimentos ao longo dos períodos coletados, que não possibilitaram uma caracterização detalhada do processo de transporte de sedimentos, sendo, por isso, dada continuidade do monitoramento. A primeira quadra da rua Marquês do Herval apresenta 163,26m de comprimento, 9m de largura, 0,0531m/m de declividade média, pavimento do tipo asfalto e uma boca de lobo localizada no lado esquerdo inferior da rua com dimensões de 0,5 x 0,3m.

Nessa rua não ocorre nenhum tipo de varrição. Desse modo, os poluentes que nela se depositam são carreados pelo escoamento superficial para as bocas de lobo seguindo diretamente para o arroio Cancela, através do sistema de drenagem pluvial. A região ao redor da rua é predominantemente residencial com a presença de alguns estabelecimentos comerciais.

Na saída do sistema de drenagem possui uma estação hidrossedimentométrica, onde ocorre o monitoramento dos sedimentos em suspensão. A área de contribuição para a determinação da concentração de sedimentos em suspensão possuía 0,012 Km<sup>2</sup>. Nesta área de contribuição está inserida a primeira quadra da rua Marquês do Herval, a rua Tamanday e uma área residencial. A rua Tamanday apresenta 142,85 m de comprimento, 9m de largura, 0,0143m/m de declividade média, pavimento do tipo bloco de concreto, duas bocas de lobo e dois poços de visitas.

A figura 4.1 apresenta a área em estudo e as estações de monitoramento.



**Figura 4.1- Localização da área de estudo. (Fonte: modificado de Dotto 2006)**

## 4.2 Monitoramento pluviométrico

Os dados de precipitação foram obtidos de uma estação pluviográfica monitorada pelo grupo GHIDROS desde 22/12/2003, distante aproximadamente 800 m da área de estudo e localizada dentro da propriedade da empresa Sest Senat.

Essa estação possui um pluviômetro eletrônico do tipo Pluvio-OTT, com intervalo de tempo de um minuto entre cada leitura a partir do início da precipitação. A figura 4.2 apresenta duas fotografias da estação pluviográfica Sest Senat.



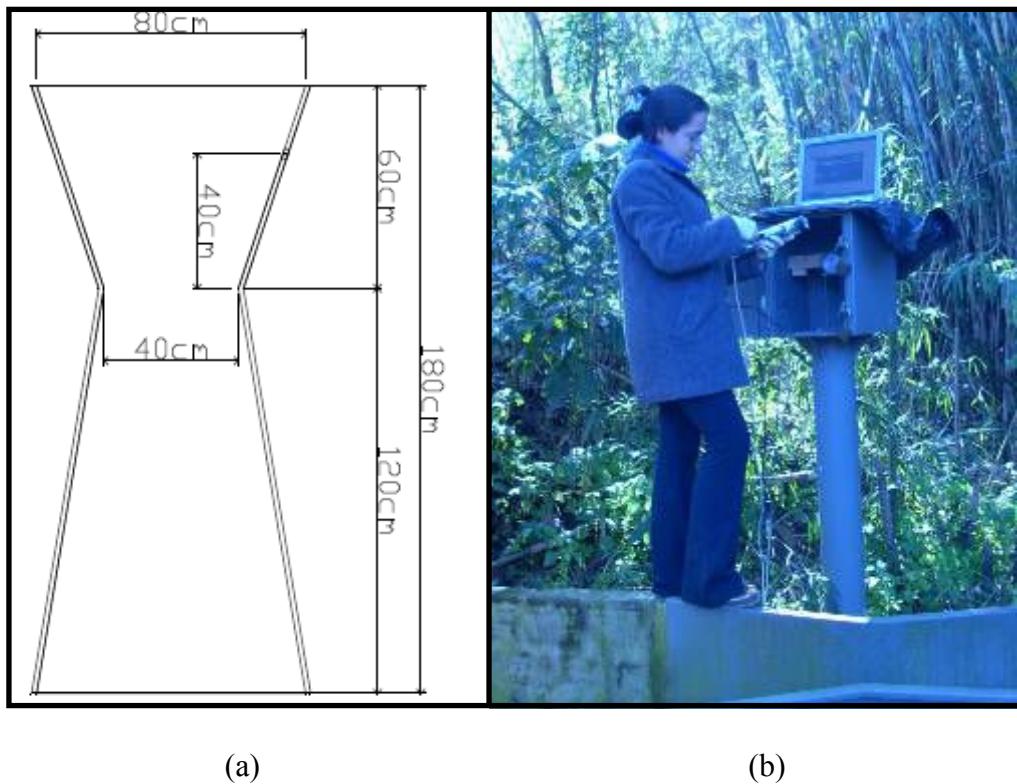
**Figura 4.2 – Estação pluviográfica Sest Senat. Fonte: Garcia (2005).**

### 4.3 Monitoramento fluviométrico

Os dados de vazão e sedimentos foram obtidos da estação fluviométrica monitorada pelo grupo GHIDROS, desde maio de 2005.

A estação está equipada com um registrador de nível digital do tipo Thalimedes (OTT) e com uma calha. O registrador de nível foi configurado para um intervalo de tempo de 1 minuto na ocorrência de no mínimo 5mm de variação no nível.

A calha contida nessa estação é uma calha de fundo plano com um estreitamento localizado a um terço da borda inicial, como a proposta por Scogerboe et al. (1972) apud Martins e Paiva (2001). A figura 4.3 apresenta as dimensões da calha e a obtenção dos dados do registrador de nível.



**Figura 4.3- Planta baixa da calha (a) e obtenção dos dados do registrador de nível (b).**

O escoamento para esse tipo de calha pode se dar em condições de fluxo livre ou submerso. No período de monitoramento o fluxo sempre foi livre, sendo a vazão medida em função do nível da lâmina de água medido na secção de estrada e dado pela fórmula 4.1.

$$Q = C \cdot h_a^{n_1} \quad (4.1)$$

onde:

$Q$  = vazão ( $\text{m}^3/\text{s}$ );

$h_a$  = nível da lâmina de água;

$n_1$  = expoente de fluxo livre, função do comprimento da calha;

$C$  = coeficiente de fluxo livre, calculado pela equação 4.2.

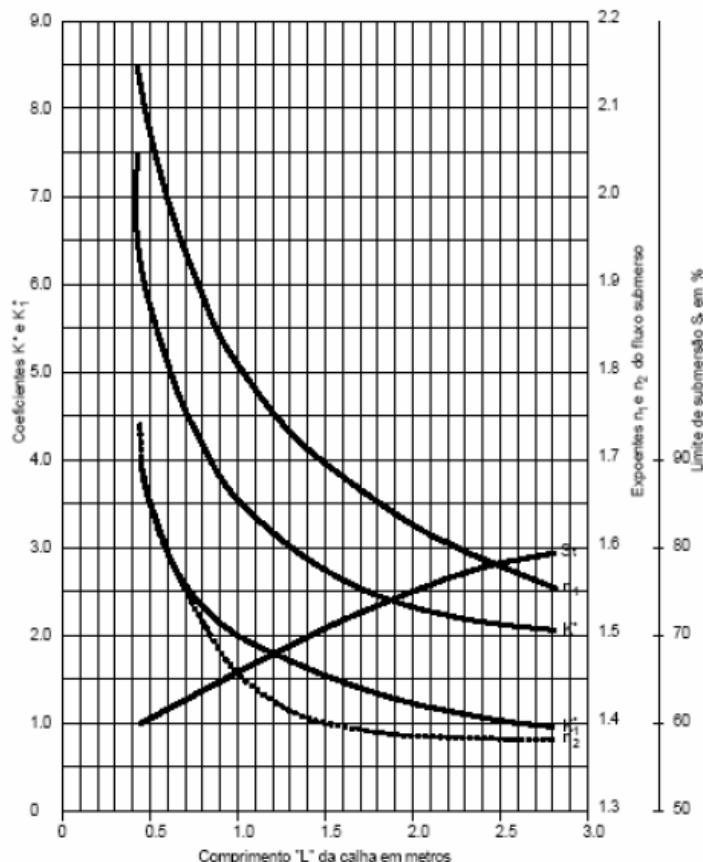
$$C = K^* W^{1,025} \quad (4.2)$$

em que:

$W$  = largura do estreitamento (m)

$K^*$  = coeficiente em função do comprimento da calha.

Conforme Dotto (2006) foi adotada uma calha proposta por Alfaro (1974) *apud* Martins e Paiva (2001) de comprimento 1,80m e largura do estrangulamento igual 0,40 para vazões entre 0,001 e 0,419  $\text{m}^3/\text{s}$ .



**Figura 4.4 - Valores de  $K^*$ ,  $K1^*$ ,  $n1$ ,  $n2$  e grau limite de submersão para a calha medidora funcionando em condições de fluxo livre e submerso. Fonte: Alfaro (1974) *apud* Martins e Paiva (2001).**

Para o equacionamento da calha, a partir do comprimento, L, e da figura 4.4 tem-se:

$$K^* = 2,45 \text{ e } n_1 = 1,65;$$

$$C = 2,45 \cdot 0,40^{1,025} = 0,958.$$

No entanto a equação resultante para o cálculo da vazão é:

$$Q = 0,958 \cdot h_a^{1,65} \quad (4.3)$$

A equação 4.3 foi verificada por Dotto (2006) através de medições de vazões com o auxílio de um sensor de velocidade baseado no princípio magnético indutivo. A verificação apresentou um bom ajuste da equação sendo utilizada neste estudo para estimativa da vazão.

#### 4.4 Monitoramento Sedimentométrico

A estação sedimentométrica está localizada junto à estação fluviométrica.

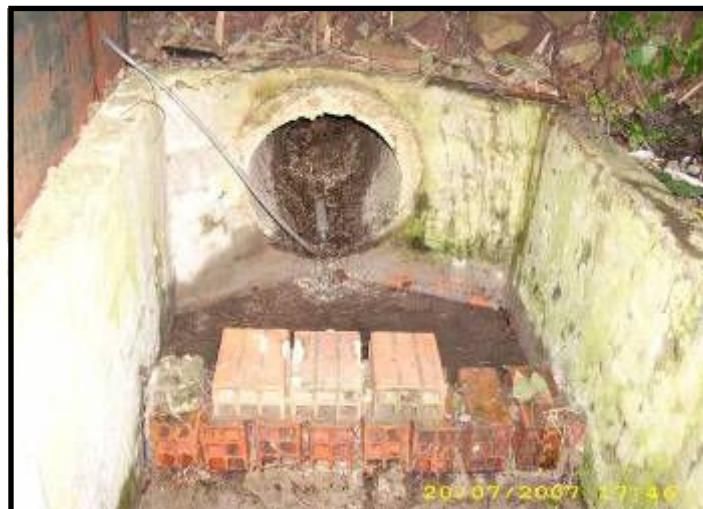
Essa estação é constituída por um amostrador de água automático modelo ISCO FR7600. O equipamento é composto por 24 garrafas plásticas com capacidade de 1000 mL, que ficam acondicionadas no interior do amostrador, o qual é composto de 3 partes bem definida: painel de controle, bomba de sucção e refrigerador. A figura 4.5 apresenta o amostrador junto à calha.



**Figura 4.5 – Amostrador ISCO modelo FR7600. Fonte: Dotto (2006).**

O amostrador funciona da seguinte maneira: um conduto com uma ponteira é colocado no ponto de coleta, conforme figura 4.6, e é conectado à bomba de sucção do amostrador. Esta bomba é programada em intervalos pré-definidos e a sucção é feita com a quantidade de

água estabelecida na programação e distribuída no número de garrafas desejadas através do braço mecânico.



**Figura 4.6 – Posicionamento da ponteira na saída do sistema de drenagem.**

## **5. METODOLOGIA**

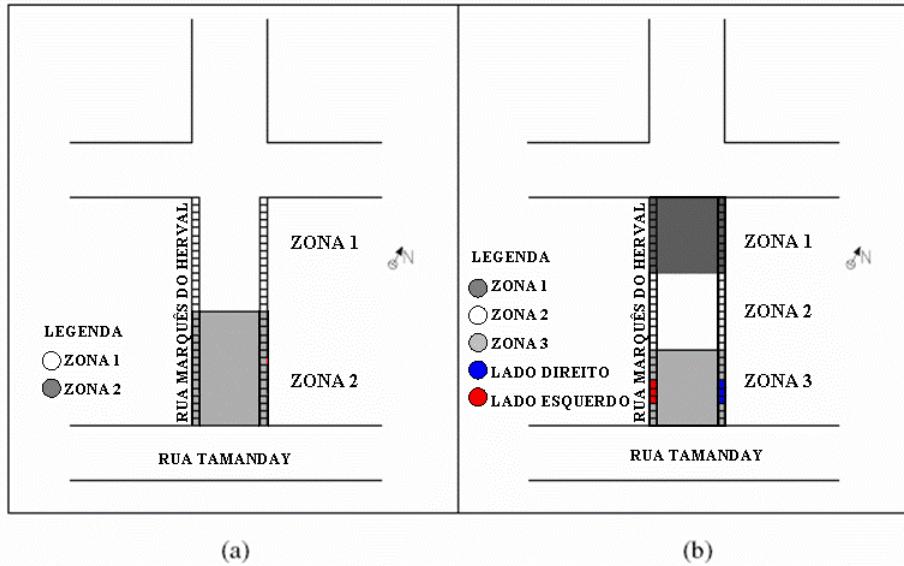
### **5.1 Coletas de sedimentos secos**

Os sedimentos secos foram coletados ao longo das sarjetas da rua Marquês do Herval, durante cinco períodos, através da utilização de um aspirador de pó, conforme estudos já realizados (Butler et al., 1992; Deletic et al., 2000; Muthukaruppan et al., 2002 e Vaze e Chiew, 2002; Dotto, 2006).

O primeiro período de coleta ocorreu de 29 de novembro a 21 de dezembro de 2006; o segundo, de 06 de fevereiro a 23 de março de 2007; o terceiro, de 28 de abril a 3 junho de 2007; o quarto, de 03 de julho a 08 de agosto de 2007; e o quinto, de 23 de agosto a nove de outubro de 2007.

As áreas de estudos foram divididas em subáreas, segundo definições adotadas por Dotto (2006). Nos dois primeiros períodos de coletas, a rua foi dividida em duas zonas (figura 5.1a), no sentido transversal, sendo sorteadas e coletadas amostras de sedimentos secos nas duas zonas, intercalando os lados da rua a cada dia. Uma vez que a coleta ocorria em uma destas superfícies, ela só era aspirada novamente, se sorteada, após um evento de precipitação. As coletas eram realizadas aproximadamente no mesmo horário, às 9:00 horas, em uma superfície de 0,5 m<sup>2</sup> (0,707m x 0,707m).

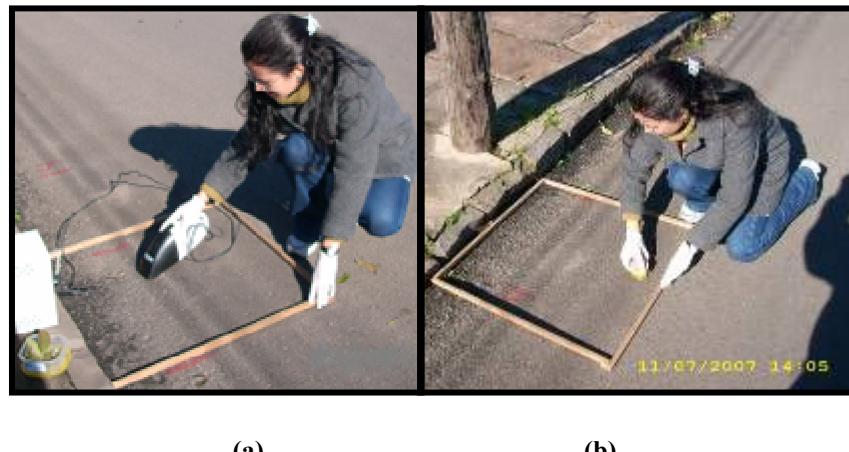
No terceiro, quarto e quinto períodos foram feitos dois tipos de coletas diferentes (figura 5.1b). Primeiro, foi aumentada a representatividade das amostras coletadas diariamente, de duas zonas para três zonas, sendo sorteadas e coletadas amostras de sedimentos secos nas três zonas. Uma vez que a coleta ocorria em uma destas superfícies, ela não era mais aspirada novamente. No segundo tipo de coleta foi separado cada lado da rua, e sendo aspirada, a cada dia, uma mesma superfície de 1,5 m<sup>2</sup> (0,707m x 2,121m). Nestes três últimos períodos de monitoramento as coletas de sedimentos secos não puderam ser realizadas pela manhã devido à umidade encontrada na superfície sendo, no entanto realizadas no período da tarde aproximadamente no mesmo horário, às 15:00 horas.



**Figura 5.1 - Desenho esquemático com a disposição de amostragem na Rua Marquês do Herval**

Dois tipos de cargas de poluentes foram coletados seguindo a metodologia e as definições adotadas por Dotto (2006). Primeiro, a superfície da rua foi aspirada, conforme a figura 5.2(a), sem nenhum processo prévio de preparação e a carga coletada foi definida como carga livre. Em seguida, a mesma superfície foi escovada utilizando-se uma escova de fibra para que, então, os poluentes finos agregados à superfície fossem soltos, como ilustrado na figura 5.2(b). Essa segunda coleta foi caracterizada como a carga fixa.

Para as coletas feitas em uma mesma superfície de 1,5 m<sup>2</sup>, de cada lado da rua, a mesma era escovada e aspirada e a coleta era definida como carga total.



**Figura 5.2 - Superfície de amostragem isolada por uma moldura de madeira, (a) aspirada e (b) escovada.**

As amostras fixas e livres de cada zona foram agrupadas, com a intenção de se obter uma amostra representativa da rua, e determinada distribuição granulométrica.

## **5.2 Coletas de sedimentos em suspensão**

As coletas de sedimentos em suspensão foram obtidas com o auxílio do amostrador de água automático. O amostrador era programado quando se tinha previsão de precipitação. O horário e o intervalo de tempo entre coletas eram estipulados com a intenção de se obter amostras no início e durante o evento. No entanto, a dificuldade de se obter amostras nesse sentido se dá pelo fato de se ter falhas nas previsões.

Após o término das amostragens, as garrafas eram retiradas do amostrador e encaminhadas para o laboratório, para obtenção da concentração dos sedimentos suspensos, através de ensaio de evaporação.

## **5.3 Análises de laboratório**

As análises de laboratório tiveram a finalidade de determinar a carga e a distribuição granulométrica dos sedimentos presentes nas sarjetas ao longo dos períodos secos e a determinação da concentração dos sedimentos das amostras coletadas nos eventos chuvosos.

### **5.3.1. Análise dos sedimentos secos**

Os dados coletados em campo foram utilizados para quantificar e caracterizar a distribuição granulométrica dos sedimentos transportados ao longo das sarjetas, bem como para a análise da influência dos eventos de precipitação na acumulação e no transporte dos sedimentos.

As amostras coletadas diariamente foram pesadas e secas em estufa a 100° C por 24 horas para remover toda a umidade. Após secas em estufa, cada amostra foi pesada novamente e, em seguida, as amostras diárias das cargas livres de cada zona foram misturadas. O mesmo ocorreu com as amostras das cargas fixas para a obtenção de uma amostra representativa.

A determinação da distribuição granulométrica de cada amostra foi feita por peneiramento, através de seis peneiras (0,063; 0,125; 0,25; 0,5; 1 e 2mm). A porção menor

que 0,063mm, representando a porção fina, não foi classificada, uma vez que se tratava de uma quantia muito pequena, conforme estudo de Dotto (2006).

### **5.3.2. Análise das amostras líquidas**

As amostras coletadas durante os eventos chuvosos foram utilizadas para a determinação da concentração de sedimentos suspensos.

Após as coletas, as amostras foram pesadas e logo em seguida cada amostra foi passada na peneira nº230 para separação do material fino. O material passante foi submetido ao ensaio de evaporação, conforme roteiro desenvolvido por Carvalho (1994), e utilizado pelo Laboratório CESP de Engenharia Civil para obtenção da concentração de sedimentos.

O ensaio de evaporação foi realizado após o repouso da amostra por 24 horas. Após este período, é importante que seja determinada a quantidade de sólidos dissolvidos presentes na amostra. Para isso, são retiradas duas pipetagens de 50 mL do sobrenadante para secagem em estufa e obtenção do valor médio. O ensaio consiste em retirar o excesso de líquido isento de sedimento e levar a amostra água-sedimento restante à estufa para posterior pesagem.

### **5.4 Análise da equação proposta por Sartor and Boyd (1972 e 1974) apud Deletic et al. (1997).**

A equação proposta por Sartor and Boyd (1972 e 1974) apud Deletic et al. (1997), que representa a acumulação de sólidos em superfícies impermeáveis, foi utilizada para a realização de seu ajuste e verificação. Sendo a equação:

$$M(T) = M_0(1 - e^{-K(t_{dry} + t')}) \quad (5.1)$$

onde:

M = quantidade de sólidos na superfície ( $\text{g/m}^2$ );

T = período decorrente desde o início da primeira chuva da série (dia);

$t_{dry}$  = duração do período seco antecedente;

$t'$  = período virtual (dia);

$M_0$  = a máxima quantidade de sólidos na superfície ( $\text{g/m}^2$ ), e

$k$  = constante de acumulação ( $\text{dia}^{-1}$ ).

Os dados utilizados para calibração dos parâmetros da equação  $M_0$  e  $k$  foram referentes ao período de 28/04/07 a 06/06/07.

### **5.5 Aplicação da equação de descarga sólida em suspensão proposta por Dotto (2006).**

Foi realizada a aplicação da equação proposta por Dotto (2006), mencionada no capítulo 3, para os eventos: 14/12/06, 02/08/07, 06/08/07, 17/09/07, 18/09/07, 13 e 14/11/07.

Lembrando a equação considerada:

$$Q_s = 7777,1Q^2 + 999,84Q \quad (5.2)$$

onde:

$Q$  = vazão ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$Q_s$  = descarga sólida ( $\text{g/s}$ )

### **5.6 Análise do uso do solo**

As condições atuais do uso e ocupação do solo foram determinadas, a partir de uma imagem do satélite Ikonos.

Foram determinadas áreas permeáveis e impermeáveis através do software Auto CAD 2000, sendo elas:

- Áreas permeáveis: terrenos e jardins;
- Áreas impermeáveis: telhados, calçadas e ruas.



**Figura 5.3 – Uso do solo**

A tabela 5.1 apresenta os valores obtidos em porcentagem para o uso do solo.

**Tabela 5.1 – Dados obtidos para o uso do solo**

Uso do Solo	Área (ha)	Porcentual (%)
Rua Asfaltada	0,15	13
Rua de Bloco de Concreto	0,11	9
Telhados e Pátios	0,54	45
Terrenos e Jardins	0,39	33
Área Permeáveis	0,78	66
Área Impermeáveis	0,41	34

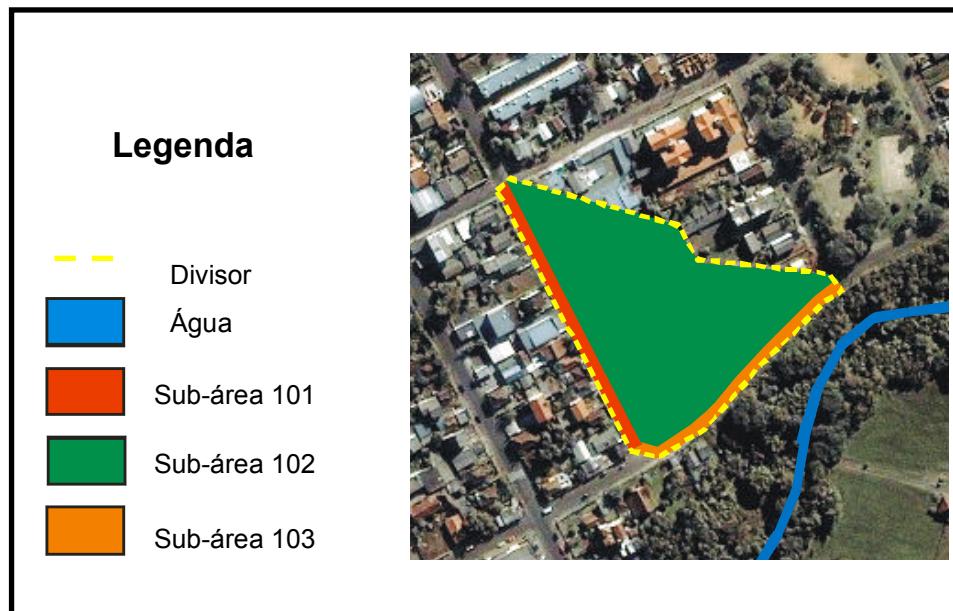
## 5.7 Discretização da área em estudo

Foi realizado detalhamento do uso do solo e discretização, tendo em vista a aplicação do modelo SWMM, de modo a representar variação espacial dos processos hidrológicos e de sedimentos.

A subdivisão da área em estudo baseou-se nas características físicas, obtidas no modelo numérico do terreno, nas informações reais do sistema de drenagem e na análise do uso do solo, resultando, assim, em 3 subáreas. As análises do uso do solo foram obtidas através da imagem do satélite Ikonos, do ano de 2004.

A discretização do sistema de drenagem foi realizada a partir de dados obtidos com levantamentos topográficos realizados para os condutos, boca de lobo e poços de visita, que serão apresentadas no capítulo 6.

A figura 5.4 mostra a área com as subáreas.



**Figura 5.4 – Área com discretização em três subáreas.**

As características físicas para cada subárea são apresentadas na tabela 5.2 . Nesta tabela, também são apresentados os valores de porcentagem de áreas impermeáveis, permeáveis e a largura obtida para cada subárea.

Para ruas asfaltadas, calçadas públicas e telhados foram adotados 100 % de impermeabilização e para rua de bloco de concreto foi considerado 78 % de impermeabilização.

Para a definição da largura das subáreas ( $w$ ), foi adotado o valor da largura do retângulo equivalente ( $le$ ), dado pela equação 5.3.

$$le = \frac{k_c \sqrt{A}}{1,12} \left[ 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{1,128}{k_c} \right)^2} \right] \quad (5.3)$$

onde:

$le$  = largura do retângulo equivalente

$A$  = área total ou subárea

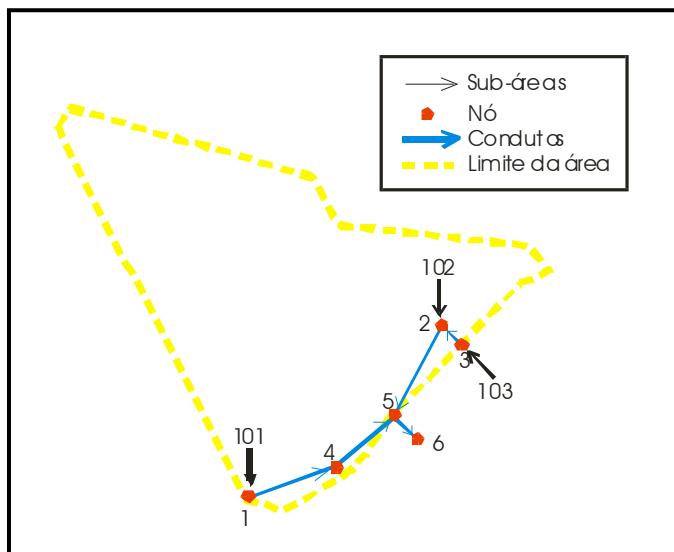
$K_c = 0,282 \cdot [P / (A^{0,5})]$  = coeficiente de compacidade

$P$  = perímetro da área total ou subárea

**Tabela 5.2 – Características das subáreas**

Subárea	Largura da subárea (m)	Área (ha)	Área Impermeável (%)	Área Permeável (%)	Declividade (m/m)
101	4,53	0,073	100	0	0,0531
102	51,05	1,064	58	42	0,0531
103	3,98	0,053	78	22	0,0143

O sistema de drenagem, após discretizado, consistiu em 5 trechos, sendo estes classificados em 5 condutos circulares. A figura 5.5 mostra um desenho esquemático do sistema de drenagem com a contribuição de cada subárea.

**Figura 5.5 – Desenho esquemático do sistema de drenagem.**

A tabela 5.3 apresenta as características dos condutos, que foram obtidas através de levantamento topográfico, visitas a campo e consulta do projeto pluvial concedida pela prefeitura de Santa Maria.

**Tabela 5.3 – Características dos condutos**

Conduto	Nós	Comprimentos	Seção Transversal	Declividade (m/m)	Diâmetro (m)
10	1-4	38,45	Conduto Circular	0,015	0,3
20	4-5	25,29	Conduto Circular	0,063	0,3
30	3-2	8,25	Conduto Circular	0,013	0,3
40	2-5	26,53	Conduto Circular	0,018	0,3
50	5-6	6	Conduto Circular	0,795	0,4

As bocas de lobo representadas pelos nós 1, 2 e 3 podem ser visualizadas nas figuras 5.6 e 5.7.



(a)



(b)

**Figura 5.6 – Boca de lobo representada pelo nó 1 (a) e boca de lobo representada pelos nós 2 e 3 (b).**



(a)



(b)

**Figura 5.7 – Boca de lobo, (a) representada pelo nó 2, (b) representada pelo nó 3 (b).**

## 6. ANALISES DO SISTEMA DE DRENAGEM

O modelo foi aplicado para a área em estudo através da utilização dos módulos Runoff e Transport. O módulo Runoff foi utilizado para a simulação do escoamento superficial e da qualidade de água para a área de contribuição e o módulo Transport para a propagação do escoamento e qualidade de água no sistema de drenagem. Os eventos simulados foram obtidos do monitoramento realizado na área em estudo no período de junho de 2005 a novembro de 2007, onde foram selecionados 6 eventos para as simulações. A discretização utilizada para as simulações da área em estudo foi detalhada no item 5.7.

A tabela 6.1 mostra as características dos eventos utilizados para as simulações.

**Tabela 6.1 – Características dos eventos usados nas simulações.**

Data	Precipitação Total (mm)	Precipitação máxima (mm)	
		5 min	1 min
03 e 04/10/2005	119,0	11,6	2,9
23/12/2005	20,1	1,3	0,3
14/12/2006	11,3	4,1	1,2
2/8/2007	19,7	1,6	0,3
18/9/2007	36,1	2,1	0,5
13 e 14/11/2007	16,4	1,1	0,2

O sistema de drenagem foi representado pelos nós, vínculos existentes entre eles. Os primeiros a serem inseridos foram os nós, os quais representam a ligação entre os vínculos.

Os nós necessitam de informações como: coordenadas (x,y); cotas do terreno e do fundo das canalizações e posicionamento. As subáreas, que representam as áreas de contribuição, são atribuídas aos nós. Neste ponto, se dá a interface entre o módulo Transport e o módulo Runoff.

Para as subáreas é necessário informar, para a simulação do escoamento superficial, o tamanho da área de contribuição, a declividade, a porcentagem de áreas impermeáveis, a altura de armazenamento de áreas impermeáveis e permeáveis, o coeficiente de rugosidade de Manning de áreas permeáveis e impermeáveis e os parâmetros de infiltração  $I_0$ ,  $I_b$  e  $k$ , da equação de Horton. Para a simulação da qualidade é necessário informar a quantidade de poluentes disponível em cada subárea, o coeficiente de acumulação, os parâmetros de carreamento.

Os vínculos representam os condutos, sendo necessário adicionar as seguintes informações:

- diâmetro dos condutos;
- os nós aos quais estão conectados;
- coeficiente de rugosidade de Manning dos condutos;
- comprimento dos conduos;
- cotas de montante e jusante;
- forma da seção transversal;
- granulometria do sedimento;
- densidade específica da partícula.

O passo de tempo ( $\Delta t$ ) utilizado foi de 1 segundo. O anexo C apresenta uma visualização das janelas do aplicativo para a entrada de dados.

## **6.1 Aplicação do modelo SWMM – Quantidade**

O módulo Runoff consiste na transformação chuva-vazão e geração de parâmetros de qualidade, considerando a área ou subárea como um todo. Para a transformação chuva-vazão esse módulo possui 11 parâmetros, sendo 4 deles determinados diretamente pela característica física da área em estudo, sendo eles: área (A), declividade (D), largura de escoamento da sub-bacia (W) e porcentagem de áreas impermeáveis (Al). Os demais parâmetros foram calibrados para cada evento, por tentativa e erro, sendo eles: coeficiente de rugosidade de Manning das áreas impermeáveis (ni) e permeáveis (np), altura de armazenamento das áreas impermeáveis (di) e permeáveis (dp) e os parâmetros de infiltração de Horton, onde:  $I_0$  é a taxa de infiltração inicial máxima (mm/h),  $I_b$  é a taxa de infiltração mínima (mm/h) e k é a constante de decaimento ( $s^{-1}$ ).

O módulo Transport propaga o escoamento superficial na rede de drenagem urbana através equações do modelo onda cinemática. Esse módulo possui 5 parâmetros, sendo 4 deles determinados diretamente pela característica física do sistema de drenagem sendo eles: comprimento (L), diâmetro (D), declividade (S) e forma da seção transversal. Apenas o coeficiente de rugosidade de Manning (n) dos condutos foi calibrado para cada evento.

## 6.2 Aplicação do modelo SWMM – Qualidade

O tipo de poluente simulado foi a concentração de sedimentos em suspensão presente no escoamento superficial e o tipo de função de acumulação considerado para esse poluente foi do tipo exponencial.

Esse módulo possui 6 parâmetros para a simulação da qualidade do escoamento, sendo 1 deles determinado diretamente, sendo ele: a duração do período seco antecedente (DRYDAY). Os demais parâmetros foram calibrados para cada evento, sendo eles: a máxima quantidade de poluentes disponível na superfície QFAC(1), a constante QFACT(2) da função de acumulação para o tipo exponencial e os parâmetros WASHPO e RCOEF da função de carreamento dos poluentes sobre a superfície.

O módulo Transport simula o transporte de sedimentos em suspensão, contido no escoamento através da rede de drenagem, através do diagrama de Shields, sendo necessário informar a distribuição granulométrica e a densidade específica de cada poluente. Para a distribuição granulométrica foi utilizado um valor médio em relação aos dias antecedentes aos eventos, coletados ao longo das sarjetas. Dois eventos não possuíam amostras dos dias antecedentes, logo, foi utilizado o valor médio de todos os cinco períodos coletados nas sarjetas da rua Marquês do Herval. A tabela 6.2 apresenta a distribuição granulométrica utilizada em cada evento simulado.

**Tabela 6.2 – Granulometria utilizada no módulo Transport para cada evento.**

<b>Tamanho (mm)</b>	<b>03 e 04/10/05</b>	<b>23/12/05</b>	<b>14/12/06</b>	<b>02/08/07</b>	<b>18/09/07</b>	<b>13 e 14/11/07</b>
	<b>% Superior</b>	<b>% Superior</b>	<b>% Superior</b>	<b>% Superior</b>	<b>% Superior</b>	<b>% Superior</b>
0.125	91.22	91.54	92.8	91.6	95.2	91.22
0.25	68.12	66.11	73.4	70.8	80.6	68.12
0.5	29.2	26.71	32.5	29	37.6	29.2
2	7.38	5.63	5.7	8.8	9.5	7.38

## 6.3. Métodos de calibração dos parâmetros do modelo

Em ambos os módulos, a calibração foi feita através de um processo manual, por tentativa e erro, individualmente para cada evento monitorado, sem a utilização de algoritmos de otimização. Segundo Figueiredo et al. (1999 apud Garcia, 2005), a calibração feita sem a utilização de algoritmos de otimização proporciona um melhor acompanhamento pelo hidrólogo a cada passo da calibração, mas, por outro lado, pode não proporcionar um melhor conjunto de parâmetros.

Para a simulação do escoamento superficial e através do sistema de drenagem, os eventos foram calibrados em função do coeficiente de correlação (R) e a comparação entre o volume escoado e a vazão de pico simultaneamente.

Para a simulação do transporte de sedimentos em suspensão a calibração foi realizada para cada evento, visando obter-se um menor erro entre os valores calculados e observados em conjunto com o coeficiente de correlação.

#### **6.4 Análise de Sensibilidade**

A análise de sensibilidade dos parâmetros relacionados com a concentração de sedimentos em suspensão, dos módulos Runoff e Transport, foi realizada com o objetivo de perceber a influência de cada parâmetro nos resultados do modelo.

Para a análise de sensibilidade foi utilizada uma variável dependente que foi o erro médio entre os valores observados e calculados.

Para esta análise foi selecionado o evento do dia 14/12/06, com uma precipitação acumulada de 11,32 mm. Este evento foi escolhido por ter apresentado um bom ajuste na calibração de seus parâmetros.

A análise foi realizada variando um parâmetro por vez, deixando os demais fixo, atribuindo à mesma variação do parâmetro, em análise, em todas as subáreas. No entanto, sabe-se que existe uma interdependência entre os parâmetros de calibração, mas para verificar a influência de cada parâmetro no resultado final, optou-se por variar um parâmetro por vez.

Os parâmetros utilizados em relação ao módulo Runoff foram: a máxima quantidade de poluentes disponível na superfície (QFAC(1)), a constante de acumulação (QFACT(2)) e os parâmetros da função de carreamento (WASHPO e RCOEF).

Para o módulo Transport foi analisado o parâmetro que representa a densidade específica da partícula.

## 7. RESULTADOS E DISCUSSÕES

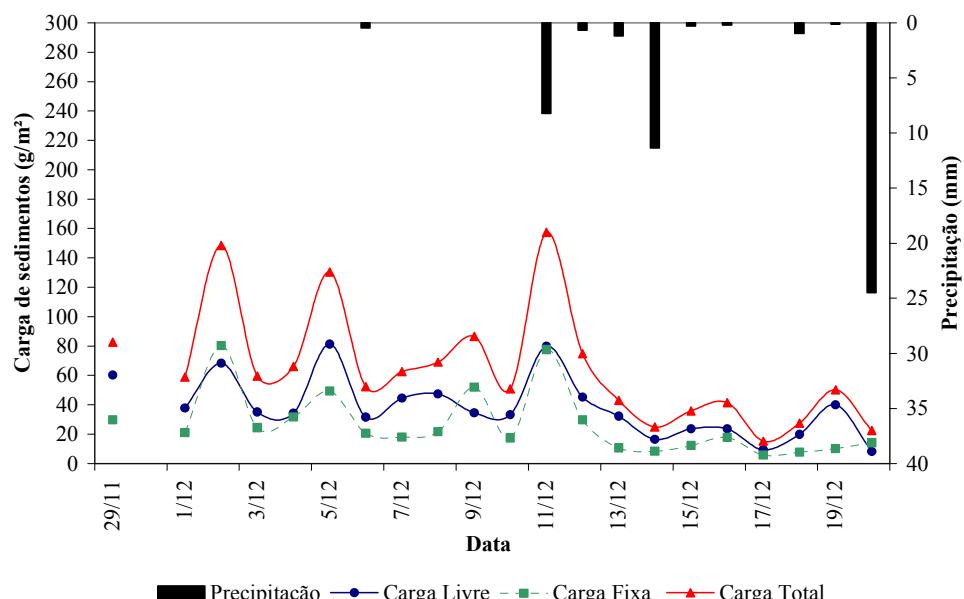
Neste capítulo são apresentados os seguintes aspectos:

- Resultados das amostragens de sedimento seco acumulado nas sarjetas durante cinco períodos de monitoramento: (1) de 29/11/06 a 21/12/06; (2) de 06/02/07 a 23/03/07; (3) de 28/04/07 a 03/06/07; (4) de 03/07/07 a 08/08/07 e (5) de 23/08/07 a 09/10/07;
- Resultados do monitoramento da descarga sólida em suspensão, através das campanhas realizadas entre dezembro de 2006 a novembro de 2007;
- Os resultados do modelo SWMM para a simulação do escoamento pluvial e da concentração dos sedimentos em suspensão.

### 7.1 Sedimento seco acumulado nas sarjetas

#### 7.1.1 Resultados do monitoramento

As coletas de sedimento seco foram realizadas conforme descrito no item 5.1. As Figuras 7.1 e 7.2 apresentam a variação das cargas livre, fixa e total coletadas no primeiro e no segundo período de coleta, respectivamente, considerando a rua em duas zonas, e as figuras 7.3, 7.4 e 7.5 apresentam a variação das cargas livre e fixa coletadas no terceiro, quarto e quinto período de coleta, respectivamente, ao longo de três zonas na rua Marquês do Herval.



**Figura 7.1 – Carga livre, fixa e total no do primeiro período de coleta.**

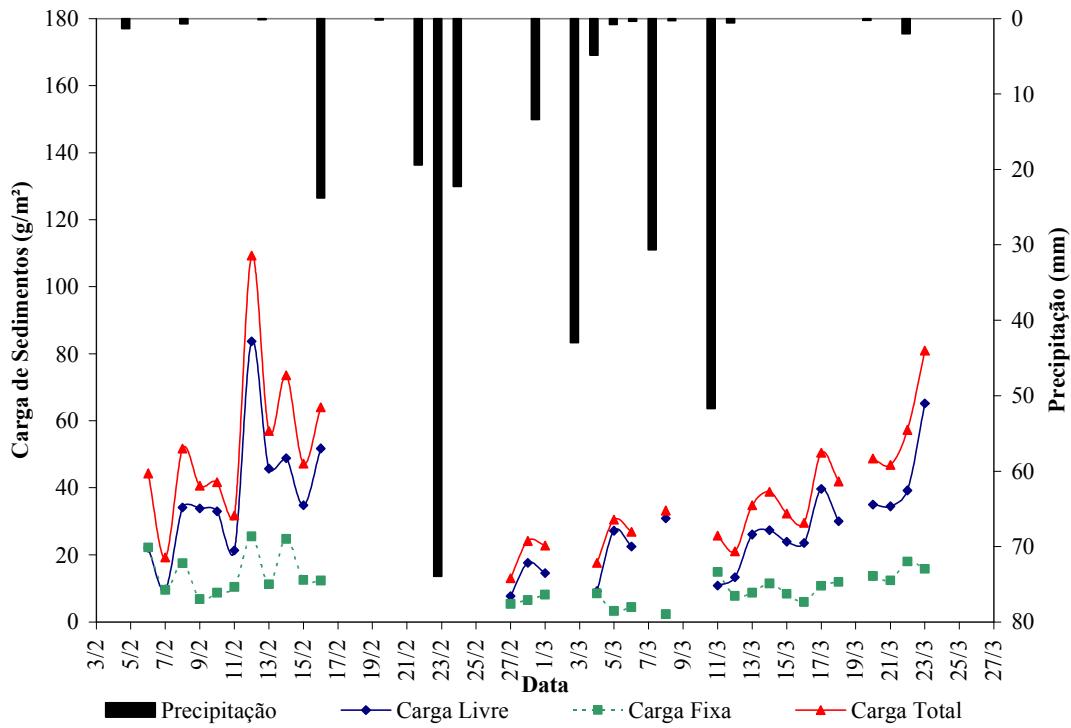


Figura 7.2 – Cargas livre, fixa e total no segundo período de coleta.

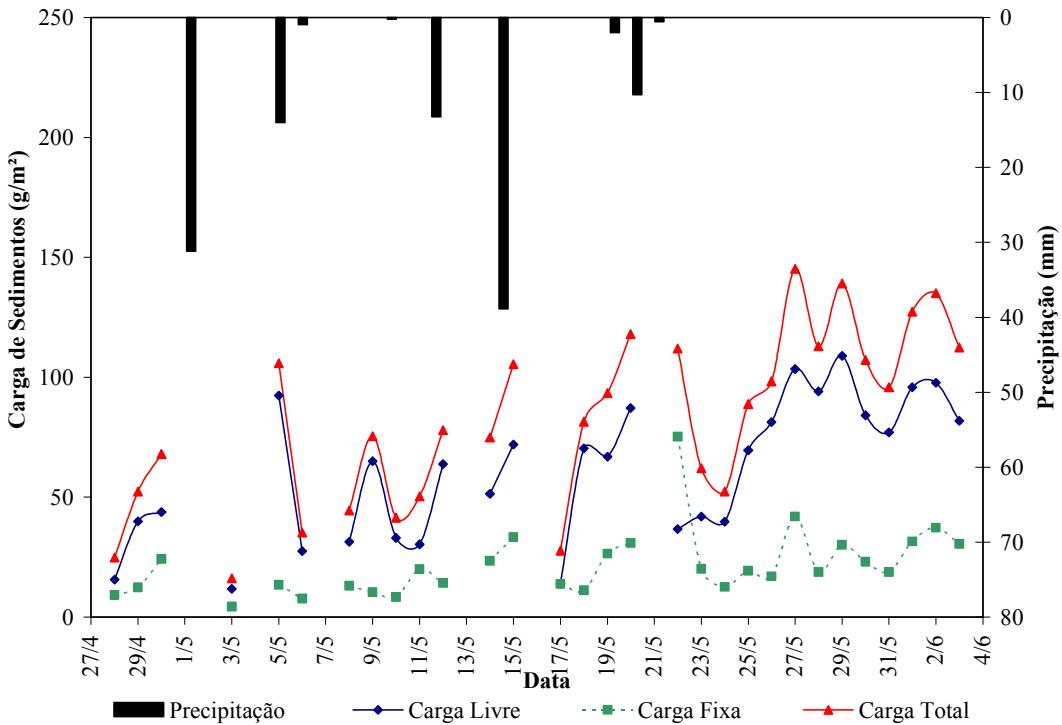
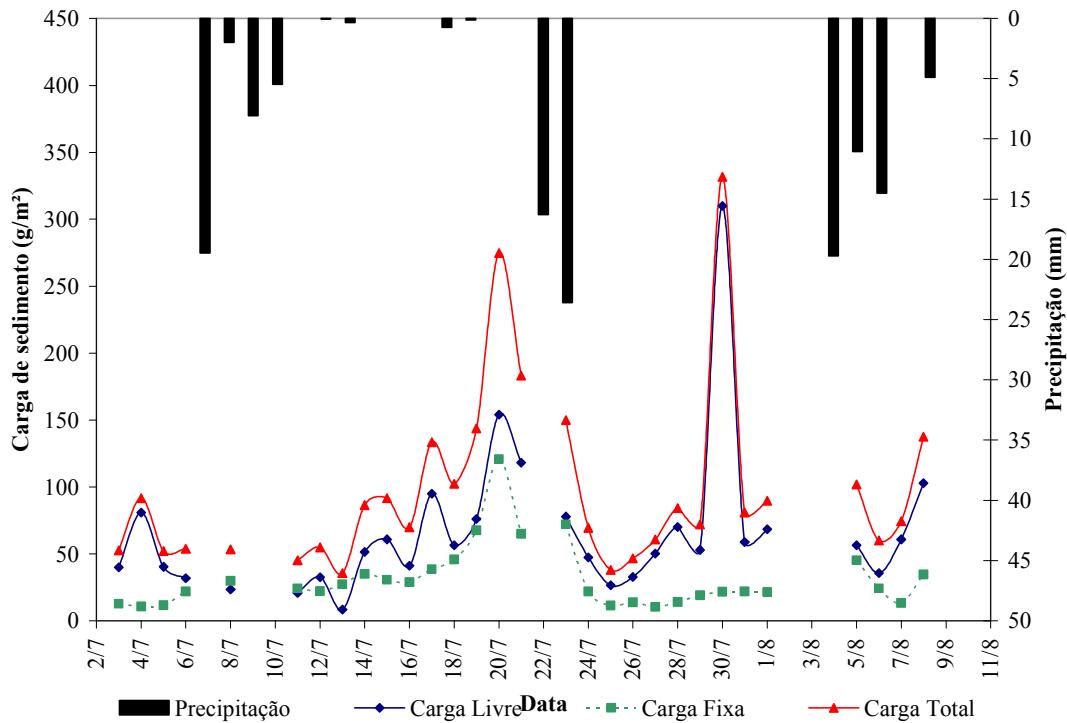
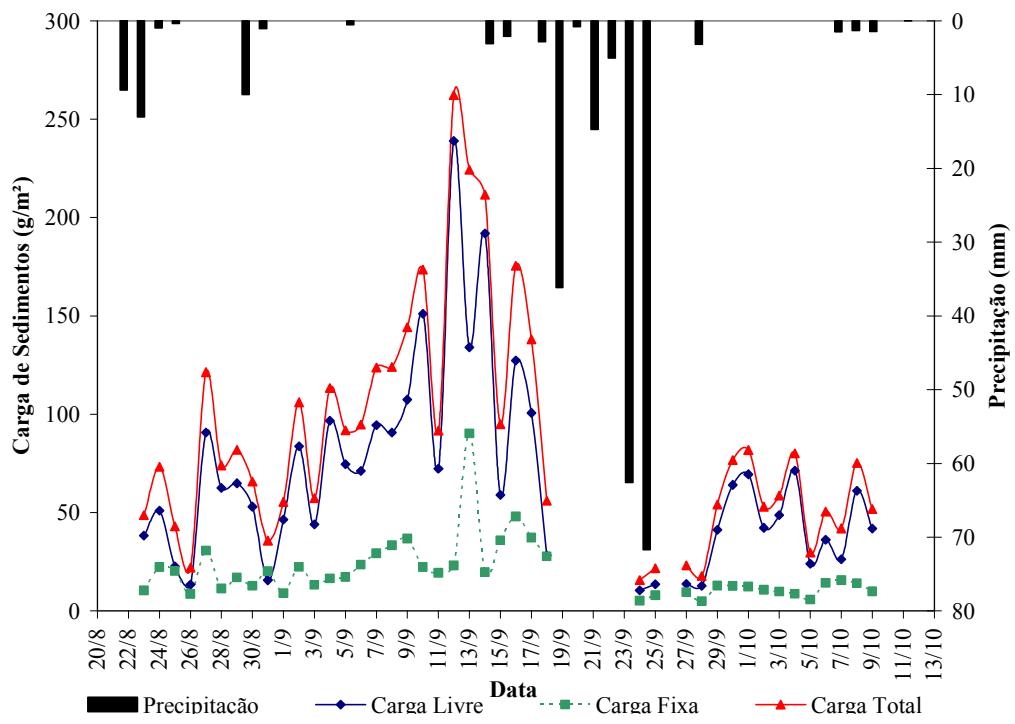


Figura 7.3 – Carga livre, fixa e total no terceiro período de coleta.



**Figura 7.4 – Carga livre, fixa e total no quarto período de coleta.**



**Figura 7.5 – Carga livre, fixa e total no quinto período de coleta.**

É possível notar, através dos gráficos, que a distribuição da carga de sedimento encontrada ao longo das sarjetas não é uniforme, tanto para os dados coletados em duas zonas como para os coletados em três zonas. Foi observado que não se obteve um ganho relevante

com a utilização de três pontos de coletas que é devido à desuniformidade do processo de acumulação nas sarjetas. Como a rua não possui nenhum tipo de varrição, isto ocasiona uma maior carga de sedimentos transportados e uma grande variação na sua quantificação. As planilhas contendo os dados de precipitação e de carga de sedimento encontram-se no apêndice A.

Materiais não particulados como vegetação, bagana de cigarro, cacos de vidros, lixo, entre outros, foram muitas vezes encontrados, representando em média 5% da carga total, sendo considerada a presença desses materiais insignificante em relação a carga total encontrada na rua.

A carga total variou de 13 a 332 g/m<sup>2</sup> nos 5 períodos coletados e apresentou um valor médio de 77 g/m<sup>2</sup>. Dotto (2006) encontrou valores de 4 a 350 g/m<sup>2</sup> para carga total e um valor médio de 60 g/m<sup>2</sup> para a mesma rua. Através desses valores é possível observar que a carga total média sofreu um pequeno aumento, que não é significativo em relação aos dados coletados. Esse aumento pode ter ocorrido por este estudo ter apresentado um número maior de coletas.

Os sedimentos também foram coletados sobre uma mesma superfície do lado direito e esquerdo da rua Marquês do Herval, conforme descrito no 5.1. As figuras 7.6, 7.7 e 7.8 apresentam a acumulação da carga total de sedimento do lado direito e esquerdo na rua, no 3º, 4º e 5º períodos de amostragem.

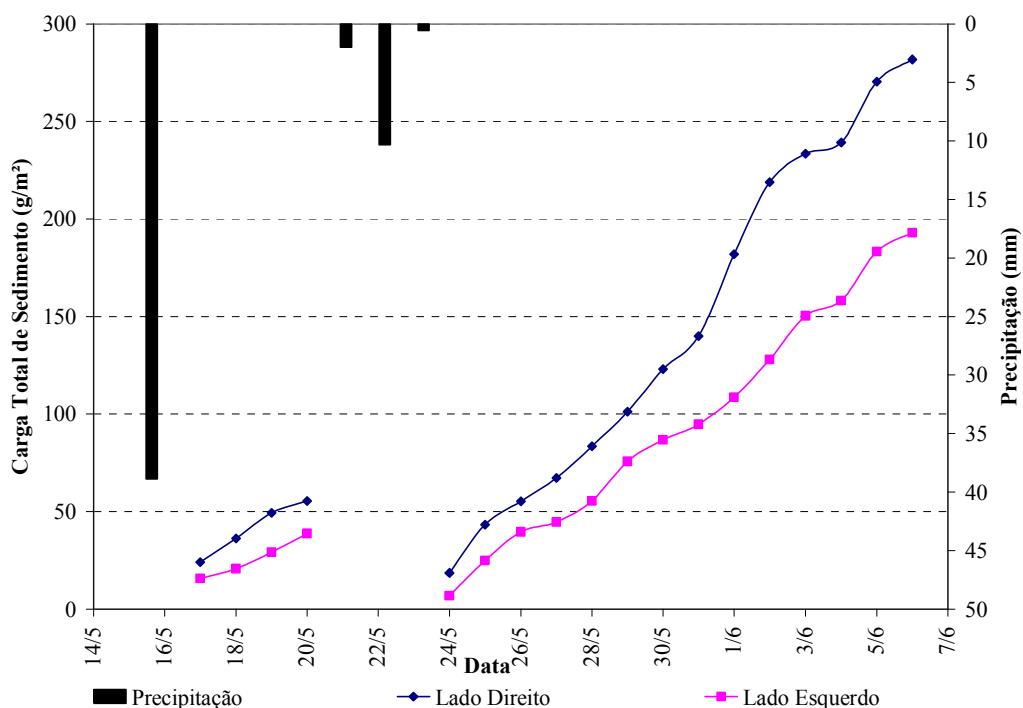


Figura 7.6 – Carga Total de sedimento do lado direito e esquerdo da rua Marquês do Herval.

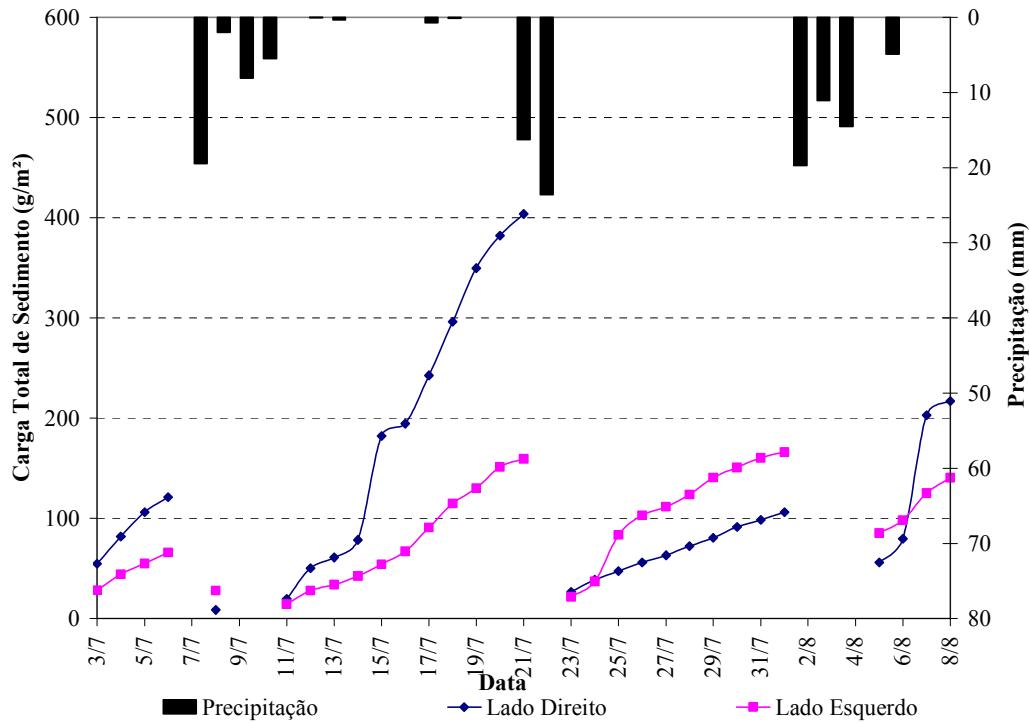


Figura 7.7 – Carga Total de sedimento do lado direito e esquerdo da rua Marquês do Herval.

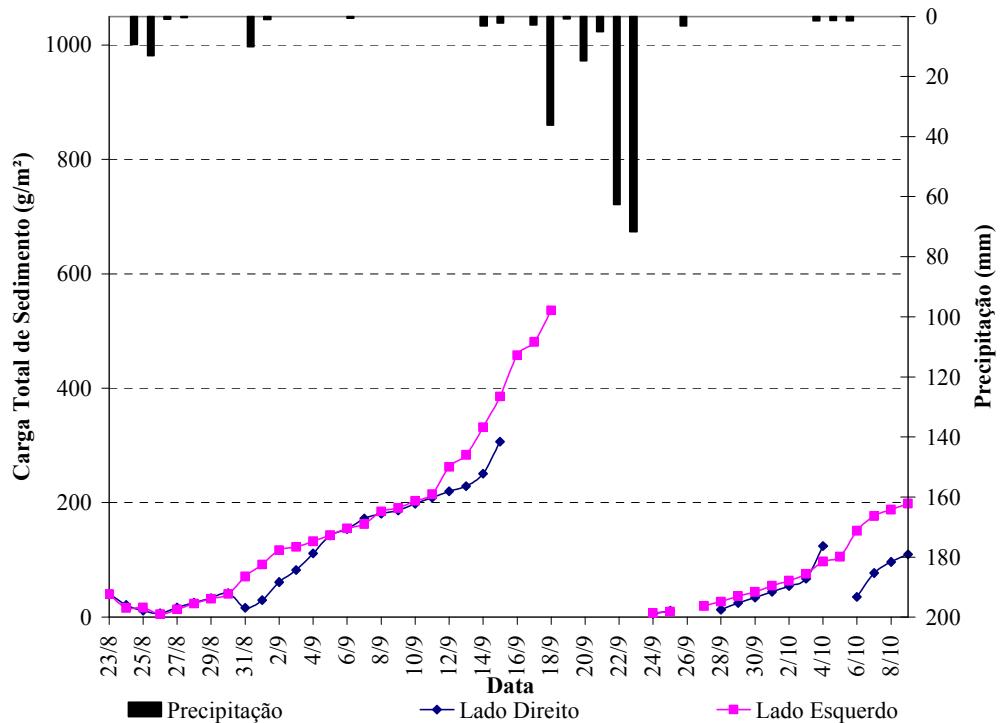


Figura 7.8 – Carga Total de sedimento do lado direito e esquerdo da rua Marquês do Herval.

Os gráficos demonstram que o lado direito da rua apresenta uma maior carga de sedimento na maioria dos dias coletados do que o lado esquerdo e que, após um evento de precipitação, a carga total de sedimento diminui consideravelmente. No entanto, esta

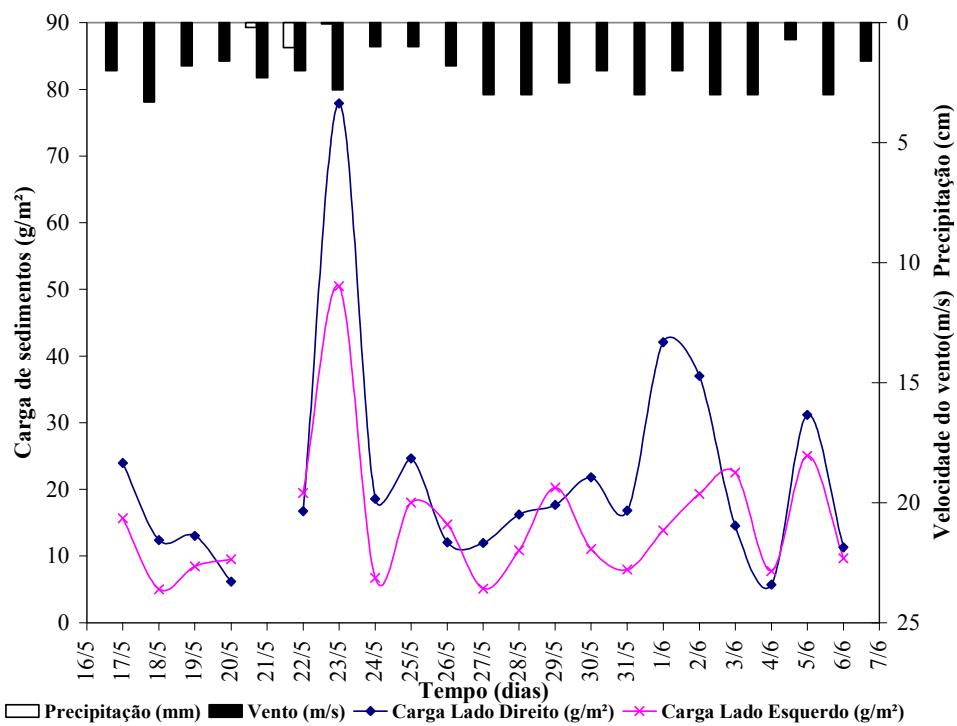
diferença entre os lados, é um dos fatores que interfere na variação da carga total de sedimento na rua quando coletadas em zonas diferentes, isto porque as coletas foram realizadas intercalando os lados a cada dia.

Um fator que contribui para uma maior carga no lado direito é o sentido dos carros na rua. No lado direito, os veículos movimentam-se de baixo para cima, impedindo o deslocamento natural das partículas de cima para baixo. No lado esquerdo da rua, os veículos movimentam-se no sentido de cima para baixo, contribuindo para o movimento natural da partícula e, com isso, ocasionando uma menor carga deste lado da rua.

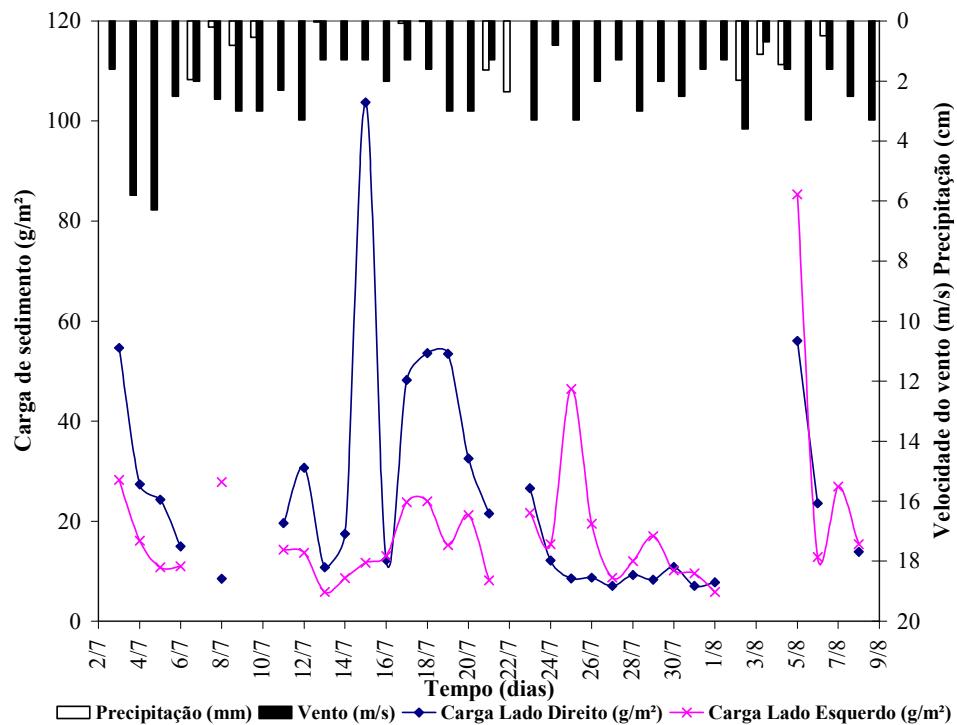
No terceiro período de coleta foi observado que o lado esquerdo da rua apresentou uma maior carga de sedimento. Neste mesmo período de coleta estava ocorrendo uma obra do lado esquerdo a uns 20 m do local de coleta, o que pode ter contribuído para este aumento da carga total de sedimento.

### **7.1.2 Efeito da Precipitação e da Velocidade do Vento**

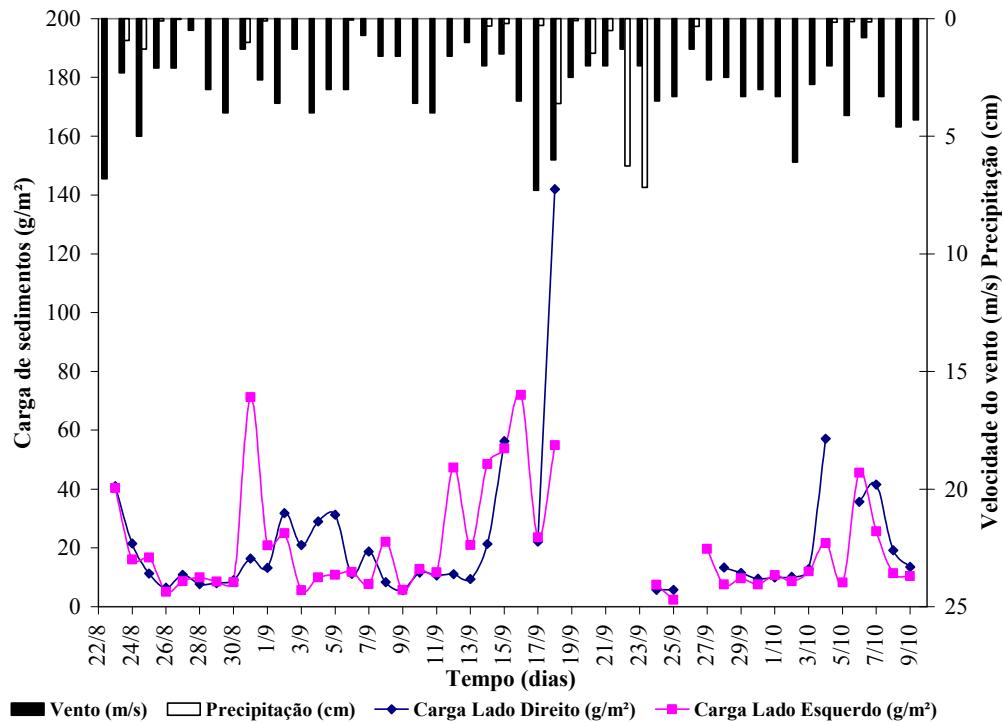
Os dados de precipitação foram obtidos da estação pluviométrica de acordo com o que está descrito no item 4.2. Os dados de velocidade do vento foram obtidos na Estação Meteorológica do Departamento de Fitotecnia, localizado no campus da Universidade Federal de Santa Maria. Foram utilizados os dados diários de velocidade do vento registrados às 9 horas e 15 horas, a 10m de altitude. As figuras 7.9 a 7.14 apresentam os valores diários da velocidade do vento, precipitação e carga total de sedimentos durante os períodos de coletas do lado direito e esquerdo da rua.



**Figura 7.9 - Efeito da velocidade do vento e precipitação na carga total de sedimentos diária – Primeiro período de monitoramento.**



**Figura 7.10 - Efeito da velocidade do vento e precipitação na carga total de sedimentos diária – Segundo período de monitoramento.**



**Figura 7.11 - Efeito da velocidade do vento e precipitação na carga total de sedimentos diária – Terceiro período de monitoramento.**

Os gráficos mostram que a carga total de sedimentos, analisada em um mesmo ponto da superfície, diminui e até mesmo aumenta após um evento de precipitação. Dependendo da capacidade de transporte do escoamento, parte da carga é removida de um ponto da superfície, podendo, mais adiante, se depositar em um outro ponto da superfície antes de alcançar o sistema de drenagem.

Durante os períodos coletados foram registradas reduções entre 47 e 98% no lado direito e 49 e 98% no lado esquerdo, em relação à carga total de sedimentos acumulada. Em relação à carga total de sedimentos houve reduções entre 43 e 96% no lado direito e de 49% e 86% no lado esquerdo e, em algumas vezes, aumentos entre 23 e 622% no lado direito e entre 104 e 1354% no lado esquerdo, após alguns eventos de precipitação. O lado direito apresentou uma diminuição média de 51% e um aumento médio de 237% em relação à carga total. O lado esquerdo apresentou uma diminuição média de 69% e um aumento médio de 356% em relação à carga total.

Dotto (2006) observou que as cargas sofreram reduções variadas entre 17 e 98% após os eventos de precipitação.

Para o lado direito, as cargas de sedimentos totais variaram de 6 a 142 g/m<sup>2</sup> e obtiveram em média um valor de, aproximadamente, 26 g/m<sup>2</sup>. Para o lado esquerdo, as cargas variaram de 2 a 85 g/m<sup>2</sup> e apresentaram um valor médio de 19 g/m<sup>2</sup>.

No primeiro período, de 17/05/07 a 06/06/07, a velocidade do vento variou de 0,7 a 3,3 m/s e apresentou um valor médio de 2,21 m/s.

No dia 23/05/07 ocorreu um aumento da carga total de sedimento de ambos lados da rua. Do lado direito, a carga sofreu um aumento de 16,75 para 77,89 g/m<sup>2</sup> e, no lado esquerdo, de 19,46 para 77,89 g/m<sup>2</sup>. A velocidade do vento, nesse dia, sofreu um aumento de 1,5 para 2,9 m/s e predominava no sentido SE, sentido esse paralelo à rua, o que contribui para um aumento da carga de sedimentos, trazida de pontos mais baixos, visto que o sentido longitudinal da rua é de NW para SE.

No segundo período de amostragem, a velocidade do vento variou de 0 a 6,3 m/s e apresentou um valor médio de 2,33 m/s.

No dia 04/07/07 ocorreu uma diminuição na carga total de sedimentos de ambos lados da rua e a velocidade do vento registrada, nesse dia, foi de 5,8 m/s e predominante no sentido NW. O vento predominante no sentido NW contribui para um aumento ou uma diminuição na carga total de sedimentos. Nesse caso, o sentido da velocidade do vento acabou diminuindo a carga total de sedimentos porque a carga disponível na superfície era pequena devido ao mês de junho ter ocorrido uma precipitação total de 487 mm, que acabou lavando a superfície e deixando pouca carga disponível.

No dia 15/07/07, o lado direito apresentou uma maior carga devido a um vazamento de areia ocasionado por um caminhão, que acabou contribuindo no aumento da carga total de sedimentos.

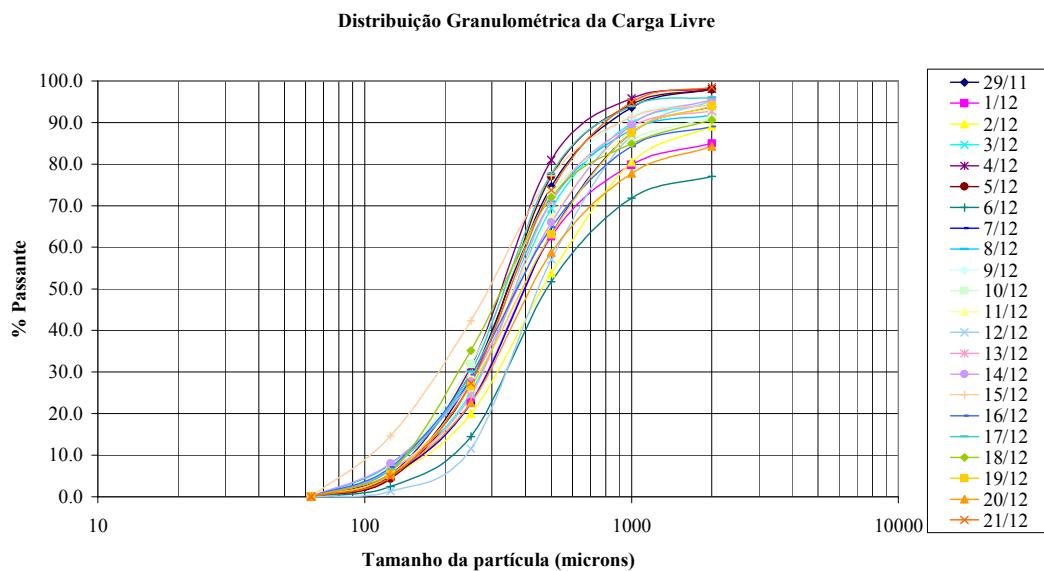
Nos dias 21 e 22/07/07 ocorreu uma precipitação de 39,88 mm que acabou transportando o sedimento originado pela construção civil ocorrida neste período acarretando em um aumento da carga total de sedimentos do lado esquerdo da rua.

No terceiro período de amostragem, a velocidade do vento variou de 0,5 a 7,3 m/s, apresentando um valor médio de 2,91 m/s. Nesse período, foi observada uma maior oscilação no lado esquerdo da rua, o que foi influenciado pela construção civil.

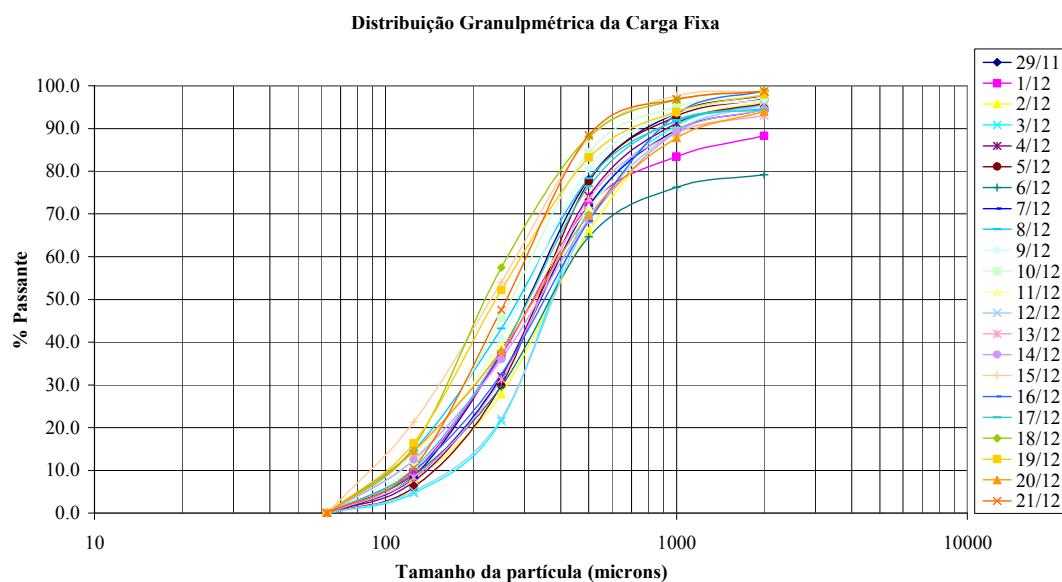
Foi possível observar que a velocidade do vento no sentido SE contribui para um aumento da carga total de sedimentos contida na superfície. No sentido NW contribui tanto para um aumento quanto para uma diminuição, no entanto, depende do período antecedente e da velocidade do vento. A estação meteorológica da área de monitoramento fica aproximadamente a uns 10 km de distância, o que dificulta o estudo de se fazer uma melhor análise da influência da velocidade do vento na carga total de sedimentos.

### 7.1.3 Distribuição Granulométrica dos Sedimentos

As figuras 7.15 e 7.16 apresentam a distribuição granulométrica das amostras coletadas na rua Marquês do Herval durante o primeiro período de amostragem da carga livre e fixa, respectivamente.



**Figura 7.12 – Distribuição granulométrica da carga livre referente ao primeiro período de amostragem.**

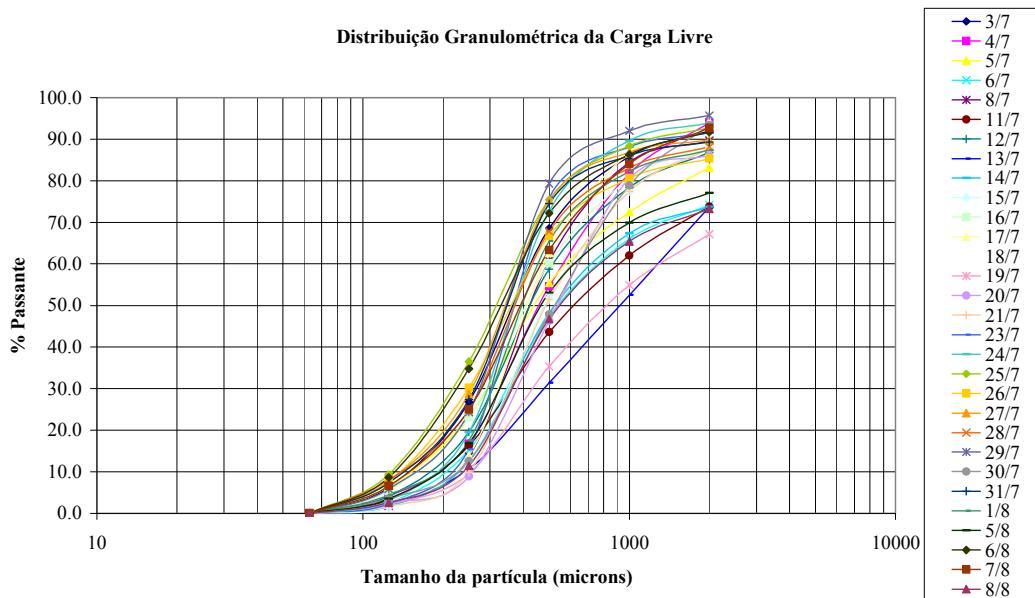


**Figura 7.13 – Distribuição granulométrica da carga fixa referente ao primeiro período de amostragem.**

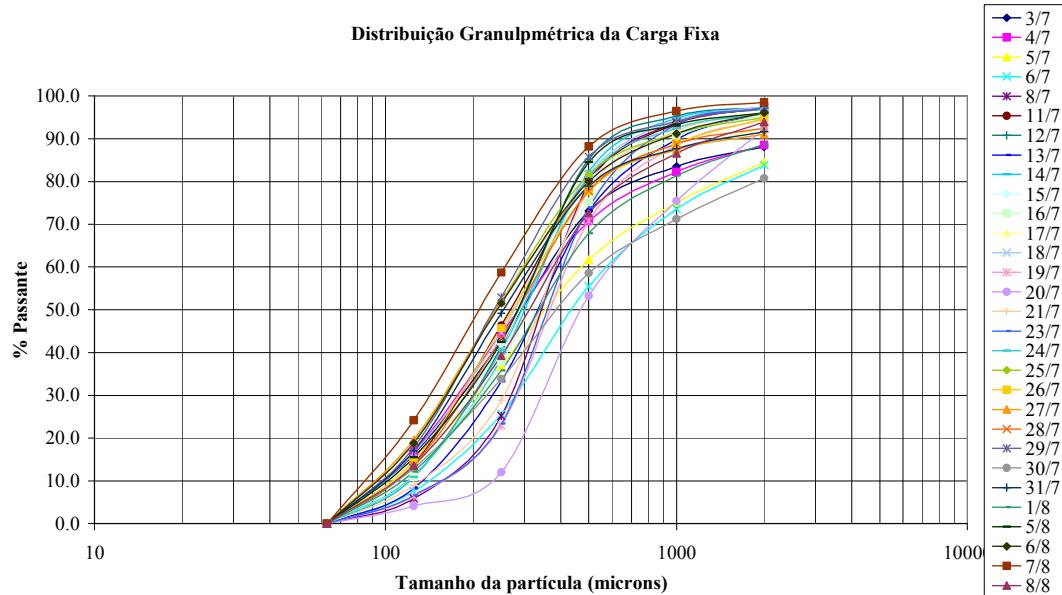
Através das figuras é possível analisar que cerca 75% da carga livre é mais fina que 2 mm, 70% é mais fina que 1mm e 5% é mais fino que 0,2mm. Em relação à carga fixa quase

que 80% é mais fina que 2mm, 75% mais fina que 1mm e 10% mais fino que 0,2mm. Essa granulometria mostrou-se semelhante até o terceiro período de amostragem

As figuras 7.17 e 7.18 apresentam a distribuição granulométrica das amostras coletadas durante o quarto período de amostragem da carga livre e fixa, respectivamente.



**Figura 7.14 – Distribuição granulométrica da carga livre referente ao quarto período de amostragem.**



**Figura 7.15 – Distribuição granulométrica da carga fixa referente ao quarto período de amostragem.**

Através das figuras é possível observar que ocorreu um aumento na granulometria que foi ocasionada pelo surgimento de uma construção civil no local. Em relação à carga livre,

apresentou 65% mais fina que 2mm, 50% mais fina que 1mm e 10% mais fino que 0,3mm. Em relação à carga fixa, quase que 80% é mais fina que 2mm, 70% mais fina que 1mm e 10% mais fina que 0,2mm. Essa granulometria mostrou-se semelhante no quinto período de amostragem. As curvas referentes às amostras coletadas nos demais períodos de amostragem são apresentadas no apêndice D.

A tabela 7.1 apresenta a média ponderada do diâmetro médio ( $d_{50}$ ) em relação às amostras totais para a Rua Marquês do Herval. Através da tabela é possível observar um aumento no tamanho da carga total de sedimentos encontrada na rua.

**Tabela 7.1 – Diâmetro médio ( $d_{50}$ ) dos sedimentos secos encontrados na rua Marques do Herval.**

Local de Amostragem	$d_{50}$ (mm)
Rua Marques do Herval	$\approx 0.442$
Rua Marques do Herval *	$\approx 0.350$

\* Fonte: Dotto (2006)

A tabela 7.2 apresenta a média ponderada dos diâmetros médios ( $d_{50}$ ) dos sedimentos em relação à carga livre e fixa deste estudo e de outros estudos realizados por Dotto (2006) e Vaze & Chiew (2002).

**Tabela 7.2 – Diâmetro médio ( $d_{50}$ ) dos sedimentos secos referentes à carga livre e fixa.**

Local de Amostragem	Livre	Fixa
	$d_{50}$ ( $\mu\text{m}$ )	
Rua Marques do Herval	$\approx 483$	$\approx 335$
Rua Marques do Herval *	$\approx 400$	$\approx 300$
Bouverie Street, Melbourne, Austrália **	$\approx 600$	$\approx 300$

\* Fonte: Dotto (2006)

\*\* Fonte: Vaze & Chiew (2002)

O diâmetro médio encontrado, neste estudo, referente à carga livre apresentou-se entre os valores encontrados pelos estudos dos referidos autores. A carga fixa apresentou-se um pouco maior do diâmetro médio em relação aos estudos referidos anteriormente. A carga livre está mais suscetível a fatores como: presença de construção civil, tráfego de veículos, velocidade e direção do vento, entre outros; logo, tende a ter valores bem variados em diferentes locais, assim como no mesmo local. Em relação à carga fixa, a variação tende a ser menor, tanto para um mesmo lugar quanto em relação a outros locais, isto devido a ser uma carga que se encontra agregada à superfície asfáltica. A carga fixa depende também do grau

de escovação, que pode ocasionar desagregação do concreto asfáltico, contribuindo dessa forma para um maior valor.

#### 7.1.4 Análise da equação proposta por Sartor & Boyd (1972 e 1974) apud Deletic et al. (1997).

##### 7.1.4.1 Calibração dos parâmetros

O modelo foi calibrado englobando dois períodos de tempo seco, 4 e 13 dias, em relação às coletas feitas do lado direito e esquerdo da rua. Esses períodos foram escolhidos, para a calibração, por possuir dado anterior e após um evento de precipitação e também por apresentar um maior número de dias secos amostrados consecutivamente. Foi encontrado um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) igual a 0,98 para ambos os lados. O valor de  $t'$  (t virtual) foi adotado igual a um dia, por ter se apresentado próximo a esse valor nas calibrações.

As figuras 7.16 e 7.17 apresentam os gráficos com a calibração dos parâmetros resultantes para cada um dos lados da rua pela equação 7.1.

$$M(T) = M_0(1 - e^{-k(t_{dry} + t')}) \quad (7.1)$$

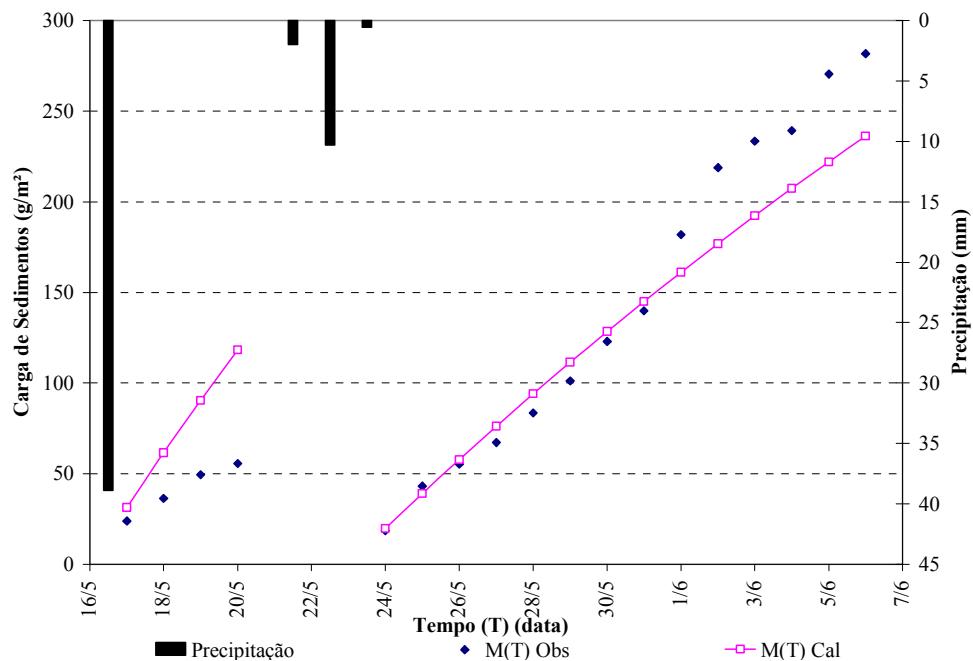
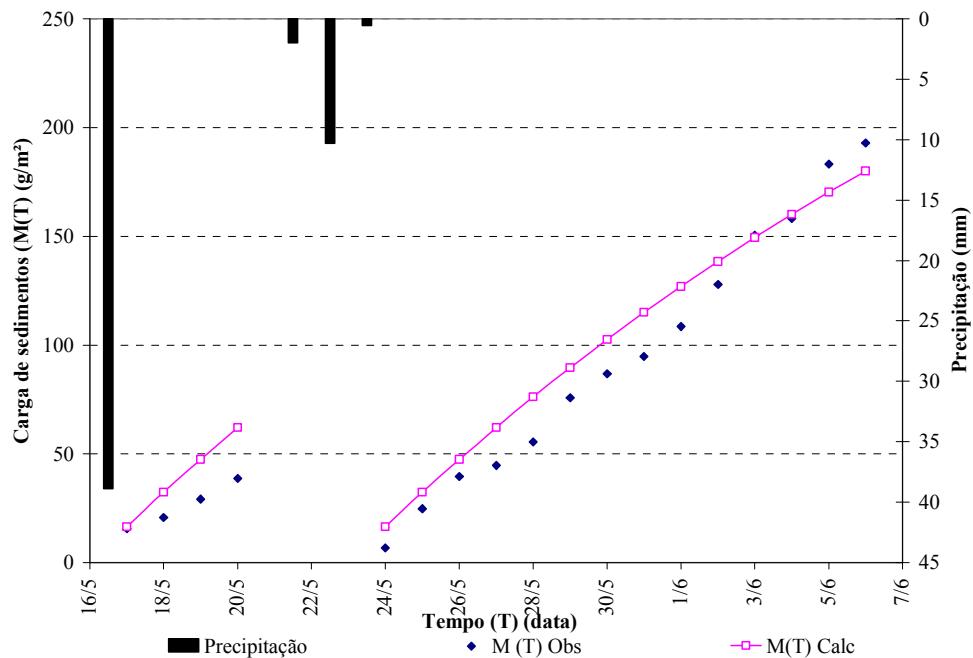


Figura 7.16 – Calibração dos parâmetros  $M_0$  e  $k$  da equação de Sartor & Boyd (1972).



**Figura 7.17 – Calibração dos parâmetros  $M_0$  e  $k$  da equação de Sartor & Boyd (1972).**

Os parâmetros calibrados  $M_0$  e  $k$  em relação aos dados observados na rua resultaram nas equações 7.1 e 7.2 para o lado direito e esquerdo, respectivamente.

$$M(T) = 800(1 - e^{-0,025(t+1)}) \quad (7.1)$$

$$M(T) = 420(1 - e^{-0,04(t+1)}) \quad (7.2)$$

Através dos gráficos e das equações resultantes é possível verificar-se que o lado direito da rua apresentou 380g/m<sup>2</sup> a mais de carga de sedimento disponível do que o lado esquerdo.

#### 7.1.4.2 Verificação do modelo

As figuras 7.19 a 7.22 apresentam a verificação da aplicação do modelo em períodos secos distintos para o lado direito e esquerdo da rua.

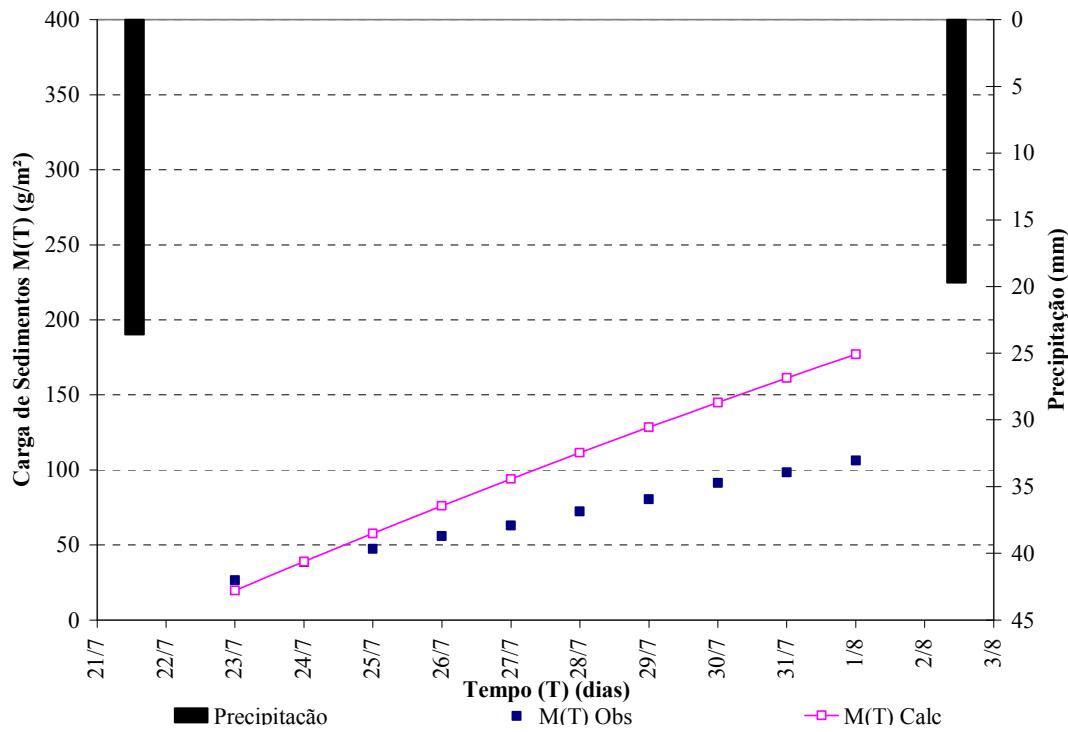


Figura 7.18 – Verificação da aplicabilidade da equação de Sartor & Boyd (1972) – lado direito.

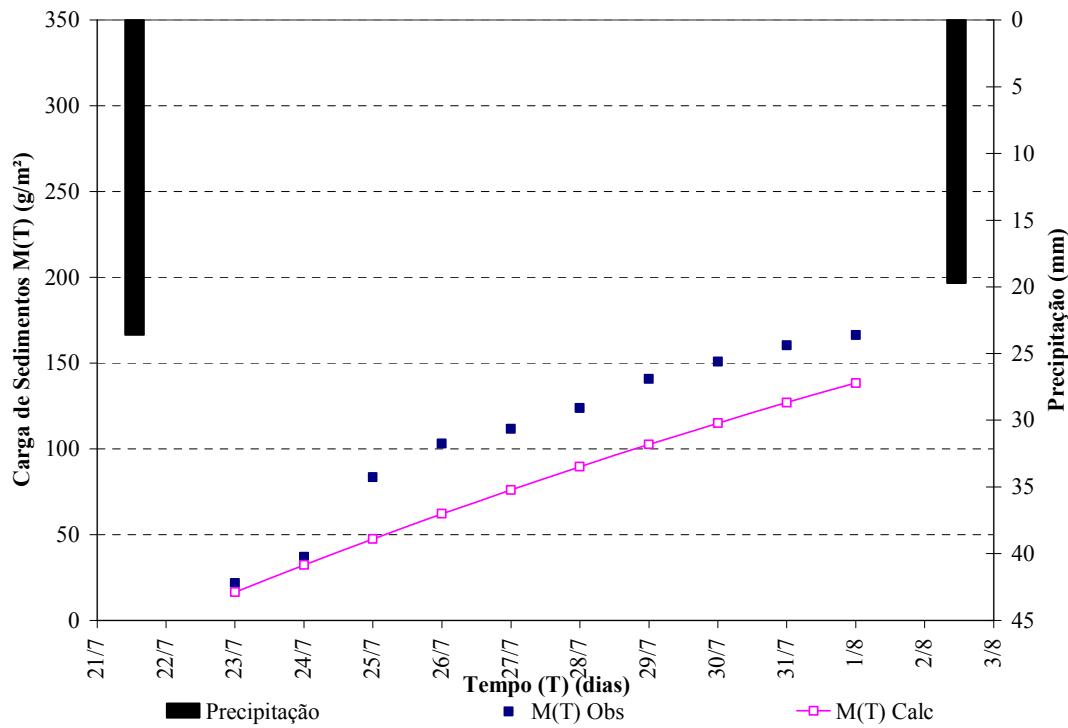


Figura 7.19 – Verificação da aplicabilidade da equação de Sartor & Boyd (1972) – lado esquerdo.

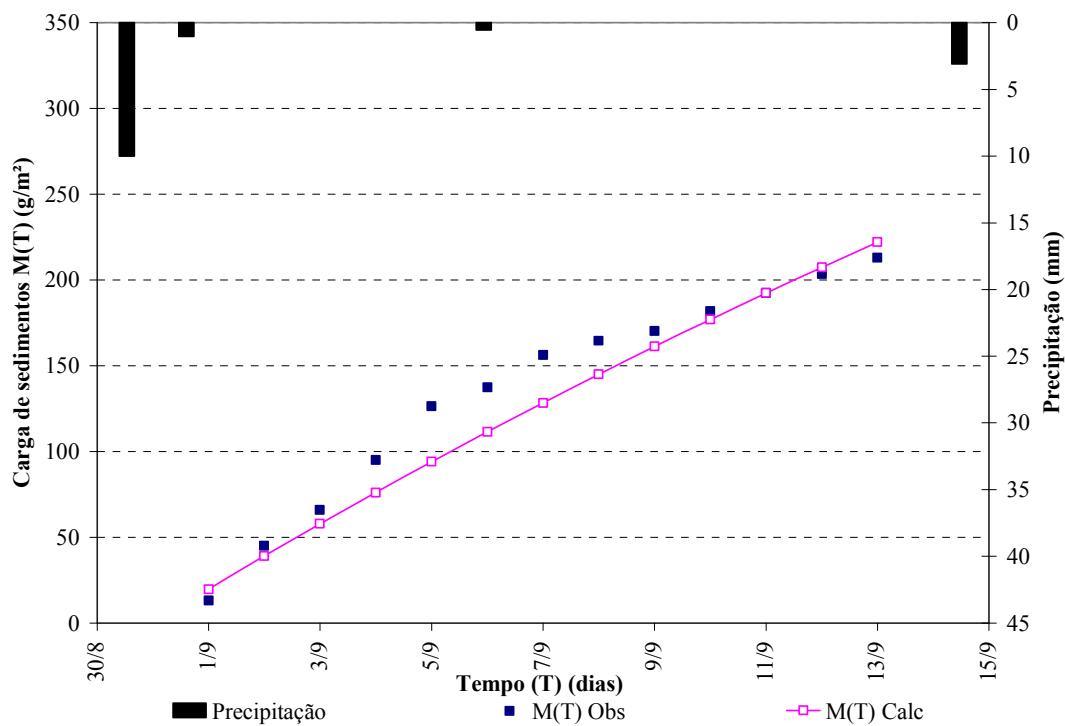


Figura 7.20 – Verificação da aplicabilidade da equação de Sartor & Boyd (1972) – lado direito.

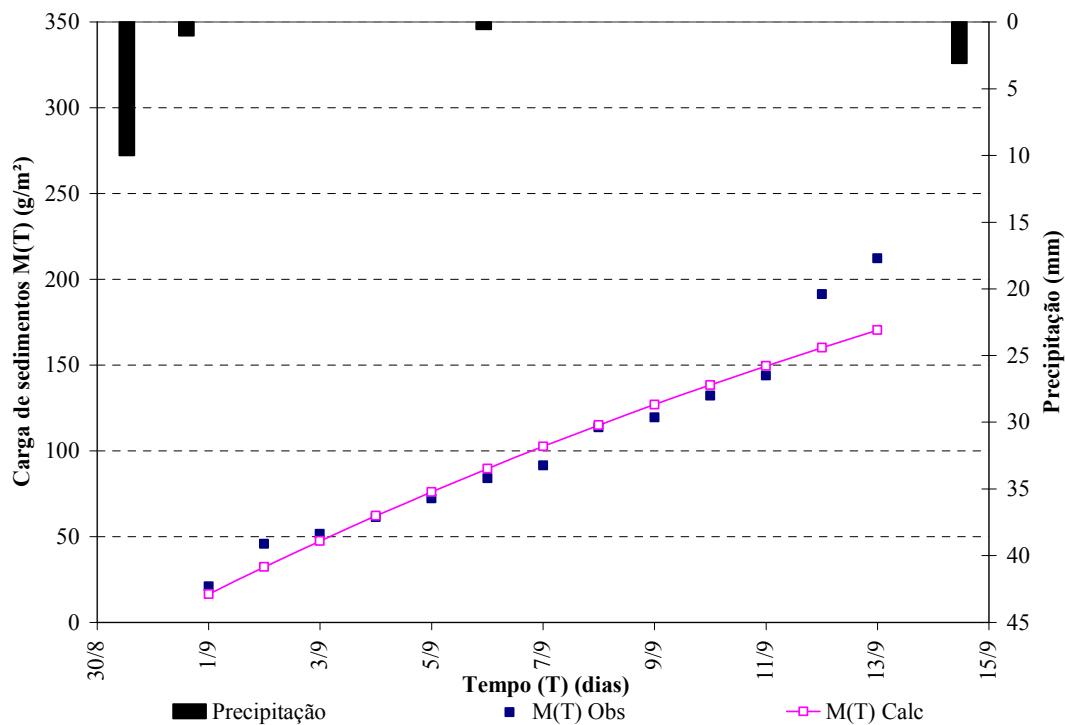


Figura 7.21 – Verificação da aplicabilidade da equação de Sartor & Boyd (1972) – lado esquerdo.

No primeiro período verificado para o lado direito da rua apresentou uma maior diferença entre os valores calculados e observados. Isto ocorreu porque a carga disponível entre os períodos de 06/06/07 a 22/07/07 sofreu uma diminuição por ter sido um período muito chuvoso, que ocasionou em uma diminuição da carga.

A equação aplicada considera que a carga diminui após os eventos de precipitação, porém, possui algumas limitações por não considerar alguns fatores que interferem na acumulação da carga total de sedimentos como, por exemplo: a influência da velocidade e direção do vento, o volume total precipitado, a intensidade da precipitação, entre outros.

Em relação à máxima quantidade de sólidos disponível, este trabalho apresentou valores maiores do que aqueles encontrados por Deletic et al. (1997 e 2000) e Dotto (2006) mencionados na tabela 3.2. As ruas estudadas por Deletic et al. (1997 e 2000) apresentam varrição periódica contribuindo para menores valores de carga máxima. Em relação à máxima quantidade de sólidos disponível na superfície encontrado por Dotto (2006), os valores apresentados neste trabalho foram maiores, podendo ter ocorrido esta diferença por este estudo ter um número maior de amostras.

A tabela 7.3 apresenta os coeficientes de determinação,  $R^2$ , e o erro médio entre os dados observados e calculados dos sedimentos secos monitorados do lado direito e esquerdo da Rua Marquês do Herval.

**Tabela 7.3 – Coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e o erro médio entre as cargas observadas e calculadas para o lado direito e esquerdo da rua.**

<b>Período</b>	<b><math>R^2</math></b>		<b>Erro médio (g/m<sup>2</sup>)</b>	
	<b>Lado Direito</b>	<b>Lado Esquerdo</b>	<b>Lado Direito</b>	<b>Lado Esquerdo</b>
22/07/07 - 02/08/07	0.99	0.95	33	29
31/08/07 - 14/09/07	0.96	0.93	10	12

Para o período de 22/07/07 a 02/08/07 a carga média de sedimento encontrada foi de 10,63 e 16,62 g/m<sup>2</sup> para o lado direito e esquerdo respectivamente. Comparando esses valores com o erro médio da carga de sedimento obtido pela equação de acumulação de 33 e 29 g/m<sup>2</sup> foi observado um erro de 210 e 74% para o lado direito e esquerdo, respectivamente.

Para o período de 31/08/07 a 14/09/07 a carga média de sedimento encontrada foi de 16,38 e 16,32 g/m<sup>2</sup> para o lado direito e esquerdo respectivamente. Esses valores comparados com o erro médio obtido pela equação de acumulação de 10 g/m<sup>2</sup> para o lado direito e de 12 g/m<sup>2</sup> para o lado esquerdo apresentam um erro de 39 e 26% para o lado direito e esquerdo

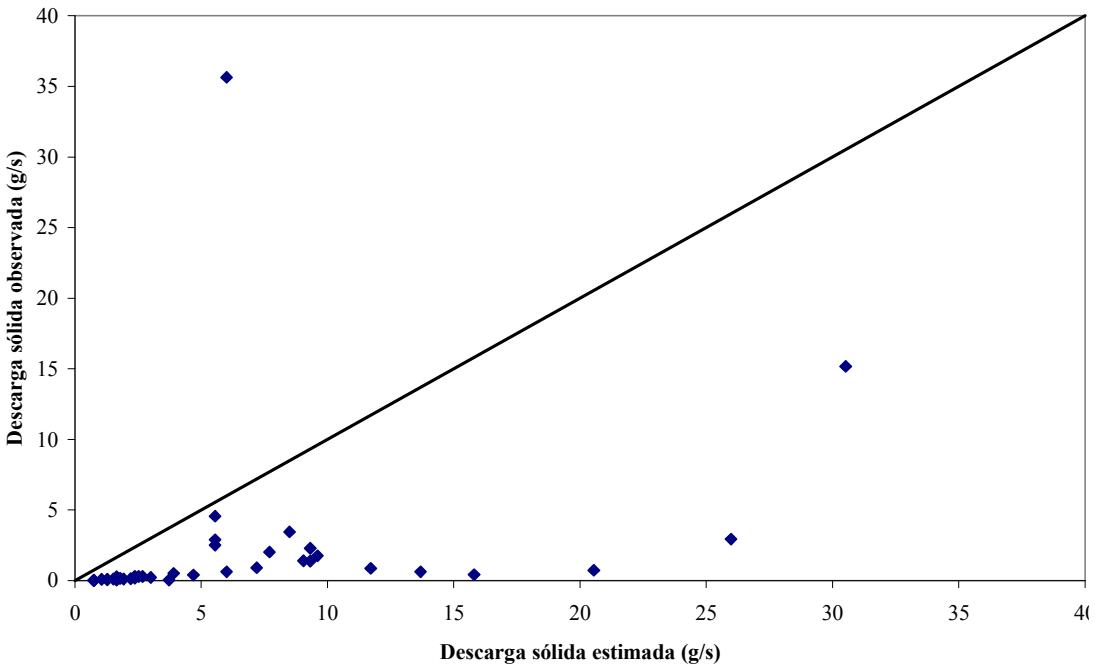
respectivamente. Logo é possível observar que para o período de 31/08/07 a 14/09/07 a equação apresentou uma melhor representação do processo de acumulação dos sedimentos.

## **7.2 Monitoramento da descarga sólida em suspensão e verificação das equações de ajuste**

Conforme descrito no item 5.2 do capítulo 5, foram realizadas campanhas de medição da descarga sólida nos eventos ocorridos nos dias 14/12/06, 02/08/07, 18/09/07 e 13 e 14/11/07. A maior dificuldade encontrada foi obter medições de descarga sólida no início e ao longo de todo o evento, de forma a ter-se uma boa representação. Isto se deve ao fato do amostrador automático não possuir um sensor de nível, logo, era preciso estipular o horário do início e o intervalo de tempo das amostragens.

As concentrações da amostras líquidas, obtidas nesse estudo, variaram de 6205 a 3,48 mg/L e apresentaram um valor médio de 476 mg/L.

Dotto (2006) observou que não existe uma correlação entre a vazão e a concentração de sedimentos, visto que a carga depende de vários fatores como: características de precipitações antecedentes, intensidade da precipitação e carga disponível para o transporte. Foi apresentada também uma relação entre a descarga líquida ( $m^3/s$ ) e a descarga sólida ( $g/s$ ), como descrito no item 3.6 pela equação 3.6. Esta relação foi verificada para os eventos 14/12/06, 02/08/07, 06/08/07, 18/09/07 e 13 e 14/11/07. A equação verificada obteve um bom ajuste para a maioria dos eventos analisados separadamente em relação ao coeficiente de correlação, no entanto, houve uma grande diferença entre os valores absolutos calculados e observados. Na maioria dos eventos a equação resultou em valores maiores do que os observados, como podem ser vistos na figura 7.22.



**Figura 7.22 – Relação entre a descarga sólida calculada pela equação de Dotto (2006) e a observada.**

A variação obtida pode ser devido à equação ter um melhor ajuste em eventos maiores, uma vez que um dos eventos utilizados para sua elaboração apresenta uma precipitação de 118,97mm. Portanto, a equação pode apresentar valores superestimados. Através desta observação, foi elaborada uma nova equação com base nos eventos dos dias 14/12/06, 02/08/07, 06/08/07, 18/09/07 e 13 e 14/11/07 que resultou na seguinte equação:

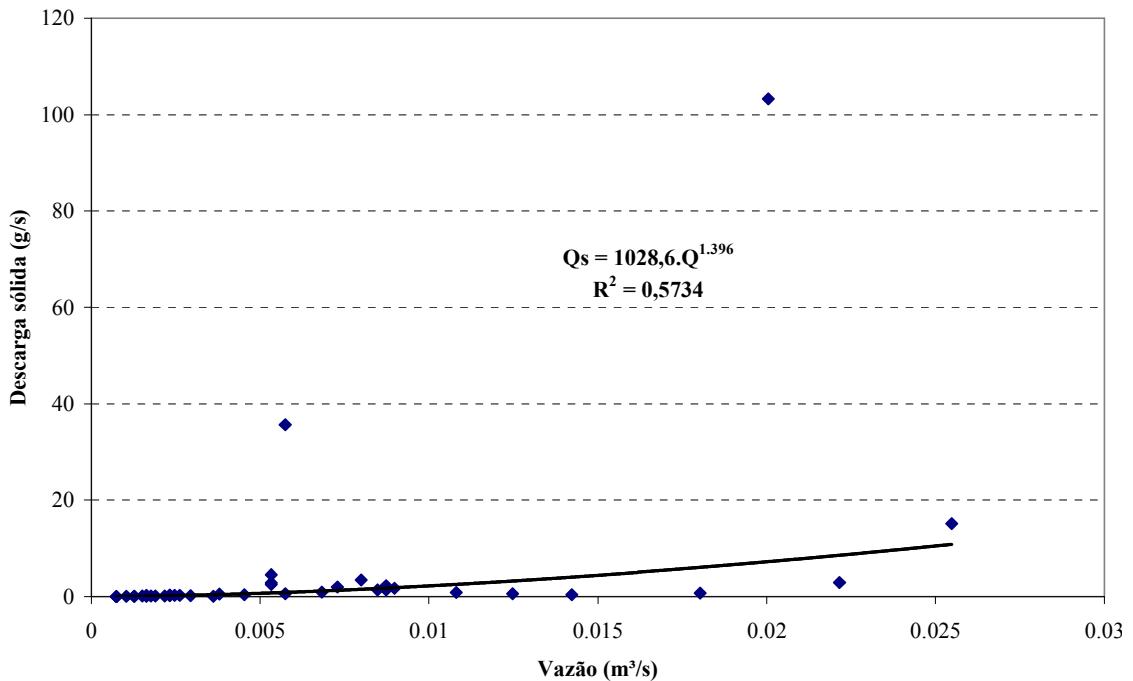
$$Q_s = 1028,6Q^{1,396} \quad (7.3)$$

onde:

$Q$  = vazão ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

$Q_s$  = descarga sólida ( $\text{g/s}$ )

A figura 7.23 apresenta a relação entre a descarga líquida ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) e a descarga sólida ( $\text{g/s}$ ) obtida pela equação 7.3.



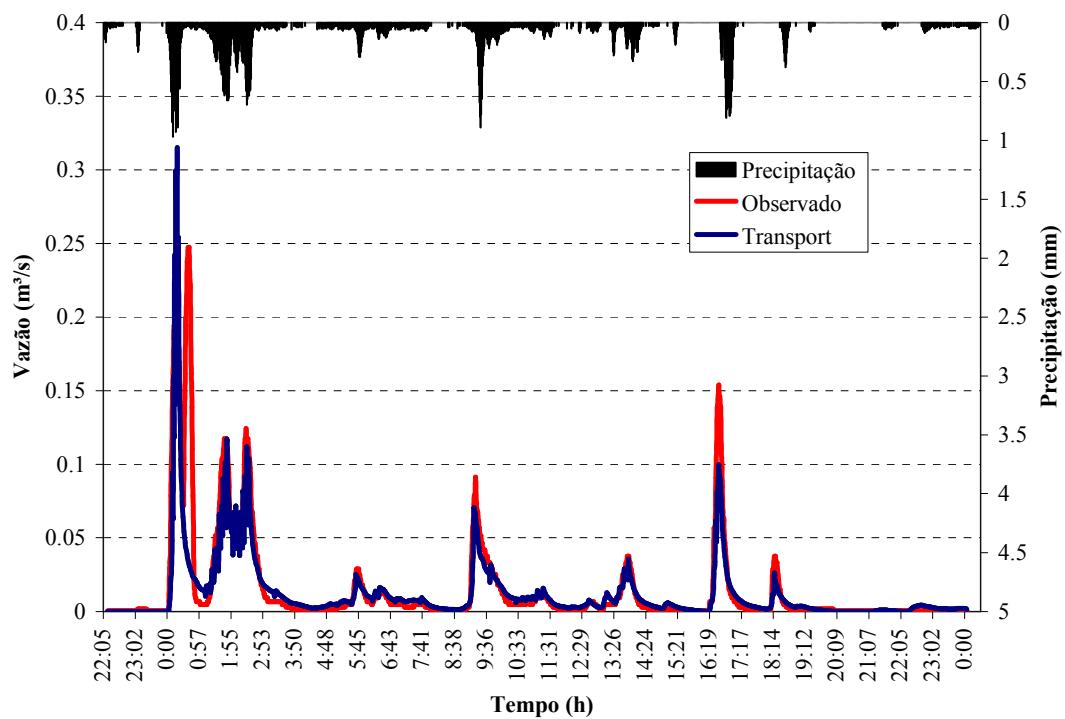
**Figura 7.23 – Relação entre a descarga líquida e a descarga sólida obtida pela equação 7.3.**

O ajuste apresenta-se bom, com grandes variações ainda nos dados referentes às menores descargas. A correlação entre descarga líquida e sólida pode apresentar baixos coeficientes de correlação, sobretudo se não houver evoluções similares no hidrograma e da curva de concentração.

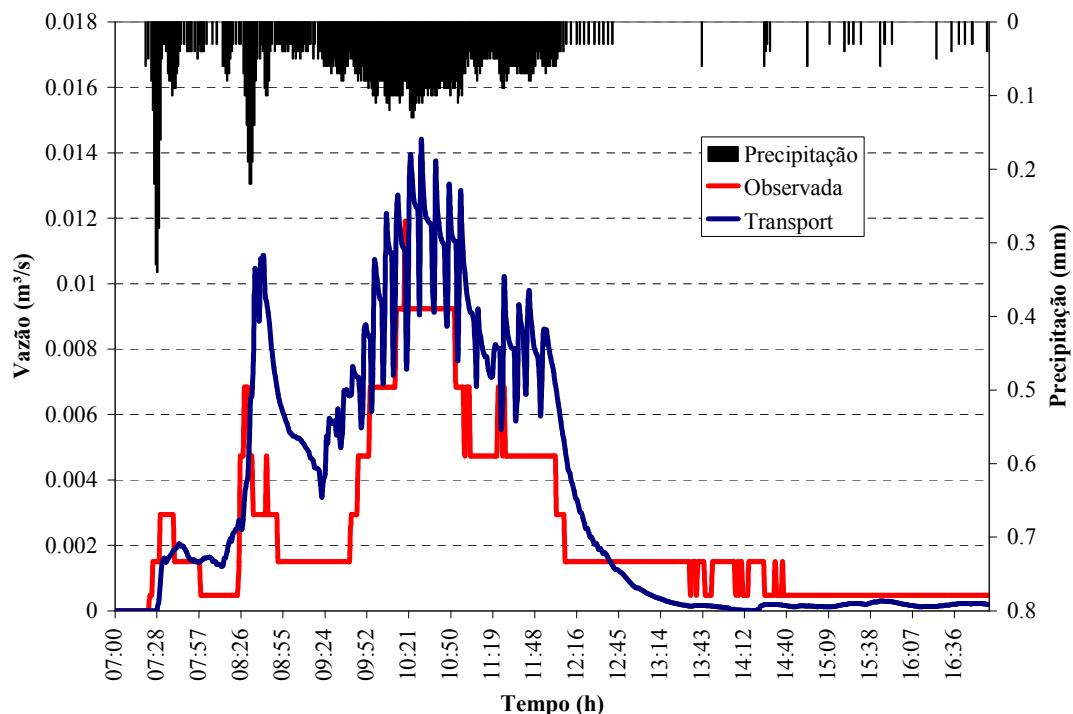
## 7.3 Aplicação do modelo SWMM

### 7.3.1 Calibração do modelo SWMM – Quantidade

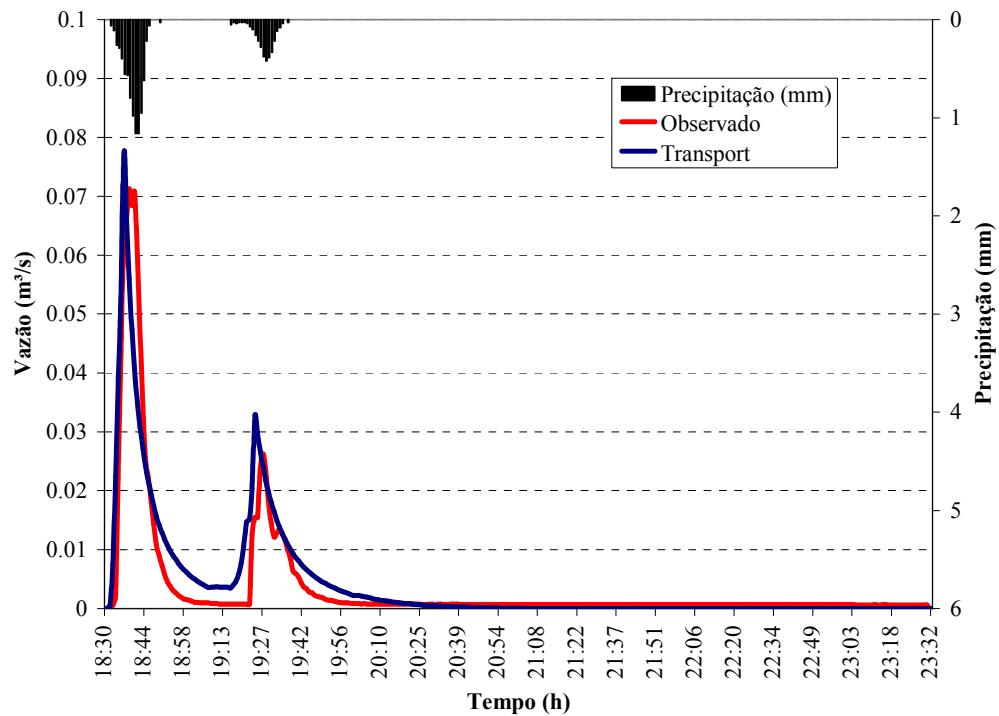
Os resultados obtidos na calibração dos parâmetros para os eventos analisados obtiveram bons ajustes representados pelo coeficiente de correlação. O coeficiente de correlação (R) médio foi de 0,87. O erro na vazão de pico e volume escoado foi de 12,45 e 5,30%, respectivamente. A qualidade do ajuste, para cada um dos seis eventos calibrados, está na tabela 7.4., que apresenta o coeficiente de correlação (R) e os erros percentuais para a vazão de pico e volume escoado. Nas figuras 7.24 a 7.29 apresentam os hidrogramas de cada evento simulado.



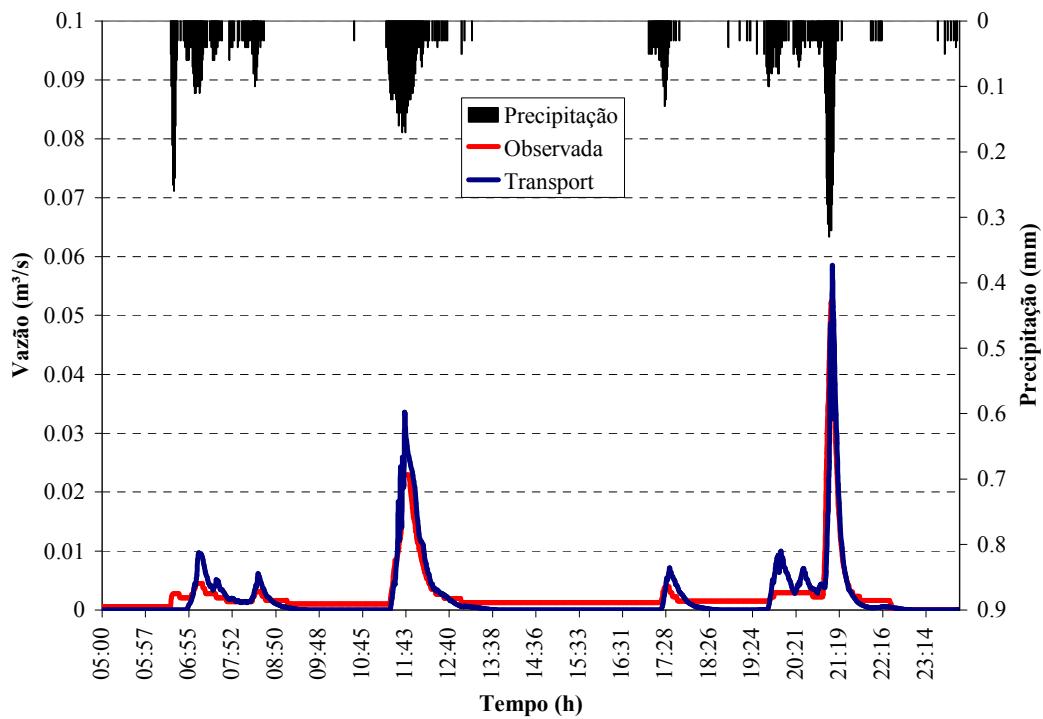
**Figura 7.24 – Hidrogramas observado e simulado - Evento dos dias 03 e 04 .10.05.**



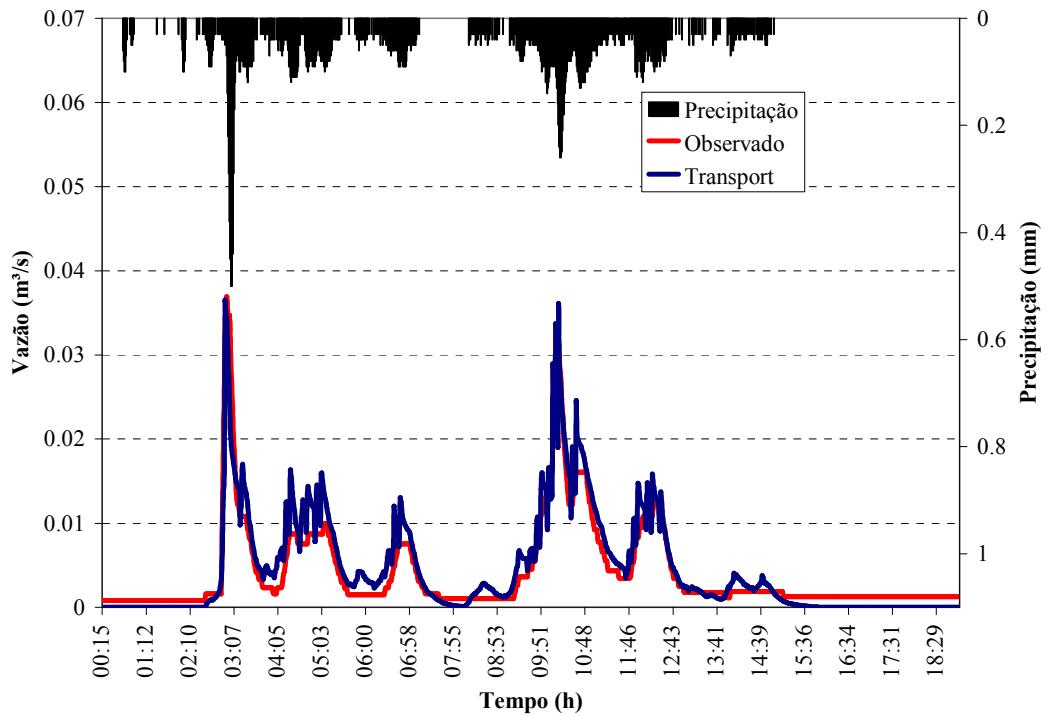
**Figura 7.25 – Hidrogramas observado e simulado - Evento do dia 23.12.05.**



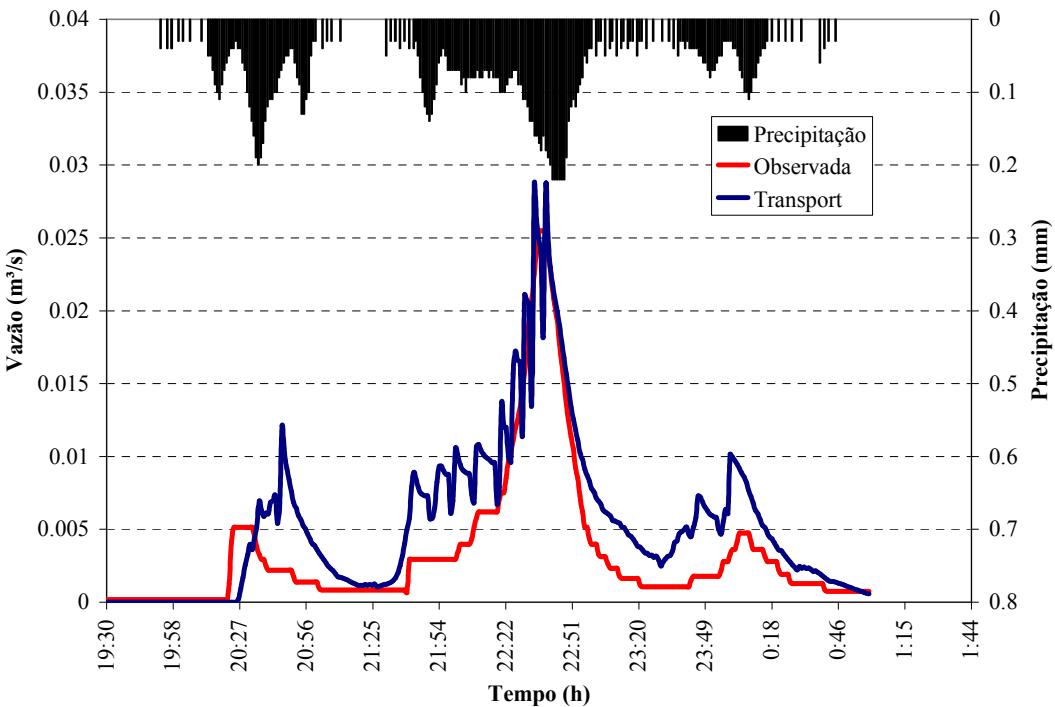
**Figura 7.26 – Hidrogramas observado e simulado - Evento do dia 14.12.06**



**Figura 7.27 – Hidrogramas observado e simulado - Evento do dia 02.08.07.**



**Figura 7.28 – Hidrogramas observado e simulado - Evento do dia 18.09.07.**



**Figura 7.29 – Hidrogramas observado e simulado - Evento do dia 13 e 14.11.07.**

A calibração do módulo Runoff para o escoamento superficial contou com o ajuste de 6 parâmetros: coeficiente de rugosidade de Manning das áreas impermeáveis ( $ni$ ) e permeáveis ( $np$ ), altura de armazenamento das áreas impermeáveis ( $di$ ) e permeáveis ( $dp$ ) e os

parâmetros de infiltração de Horton  $l_0$ , taxa de infiltração inicial máxima (mm/h) e  $l_b$ , taxa de infiltração mínima (mm/h). No módulo Transport a calibração para a propagação do escoamento através do sistema de drenagem foi realizada no ajuste do coeficiente de rugosidade de Manning dos condutos pertencentes ao sistema de drenagem. A seguir cada parâmetro é analisado.

#### \* Coeficiente de rugosidade de Manning

O coeficiente de rugosidade de Manning abrange grande faixa de valores para cada tipo de solo, sendo, por isso, um parâmetro de difícil análise.

O valor médio encontrado nas simulações para o coeficiente de Manning das áreas impermeáveis foi de 0,018 e para as áreas permeáveis foi de 0,237. Para os condutos, os valores do coeficiente de rugosidade de Manning variou de 0,011 a 0,015, valores esses que se encontram dentro da faixa de valores apresentados na bibliografia (James et al., 2003).

Chen & Adams (2007) encontraram valores médios para o coeficiente de rugosidade de Manning em uma bacia urbana, utilizando o modelo SWMM, na ordem de 0,015 e 0,25 para áreas impermeáveis e permeáveis, respectivamente.

Temprano et al. (2006) encontraram valores para o coeficiente de rugosidade de Manning em uma área urbana residencial, utilizando o modelo SWMM, que variaram de 0,02 a 0,45 para áreas permeáveis e de 0,010 a 0,015 para áreas impermeáveis. Para os condutos, os valores de rugosidade variaram entre 0,011 a 0,013.

Garcia (2005) encontrou valores médios para o coeficiente de rugosidade de Manning, utilizando o modelo SWMM, para áreas impermeáveis de 0,027 e 0,417 para as áreas permeáveis.

#### \* Armazenamento em depressões

O armazenamento em depressões ocorre devido à detenção da água sobre a superfície resultando em perdas iniciais no escoamento. Keifer, 1960 (apud James et al., 2003), encontrou valores de 1,6 e 6,4mm em áreas impermeáveis e permeáveis, respectivamente. Garcia (2005) determinou o armazenamento em depressões para três condições de escoamento, sendo elas: condições A, de alta intensidade, que ocasionam inundações na bacia; condições B, de alta intensidade e que não ocasionam inundações; e condições C, de baixa intensidade. Os valores médios encontrados variaram de 1,5 a 6,0mm para áreas impermeáveis e de 2,8 a 9,5 mm para áreas permeáveis.

Na calibração foram encontrados valores médios de 2,0 a 2,13mm para áreas impermeáveis e permeáveis, respectivamente. Os valores encontrados mostraram pouca

diferença, sendo justificado pela pequena porcentagem de áreas permeáveis em relação às áreas impermeáveis.

#### \* Parâmetros de infiltração

Os parâmetros de infiltração calibrados da equação de Horton utilizados, neste estudo foram  $I_0$  e  $I_b$ .

O parâmetro  $I_0$  que representa a infiltração máxima inicial apresentou um valor médio de 66,67 mm/h.

O parâmetro  $I_b$  que está relacionado com o tipo do solo existente na área em estudo, apresentou um valor médio de 1,55mm/h. Este valor determina a predominância de solos pouco permeáveis, como pode ser visto no item 5.6 de análise do uso do solo.

A constante de decaimento ( $k$ ) da equação de Horton foi mantida constante para todos os eventos. Seu valor foi adotado igual a  $0,00558\text{ s}^{-1}$ , baseado nos valores encontrados por Bastos (2006) na bacia hidrográfica Alto da Colina.

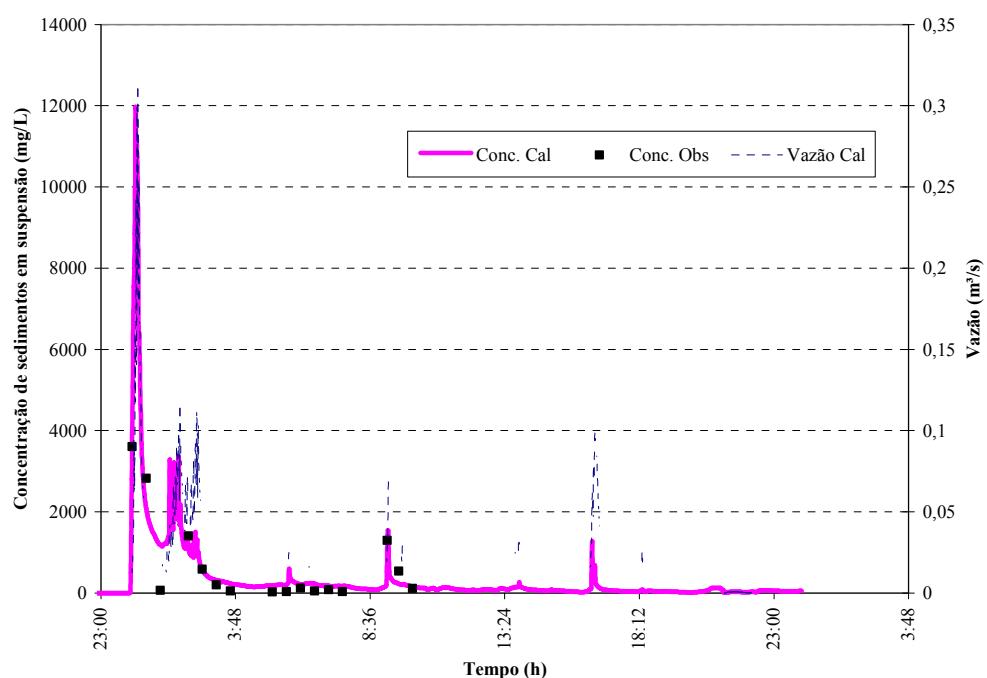
**Tabela 7.4 – Parâmetros obtidos na calibração da vazão no modelo para a área em estudo.**

Evento	P total (mm)	(ni)	(np)	(di)	(dp)	(I0)	(Ib)	(k)	R	Erro(%)	Erro(%)	V0l
03 e 04/10/05	118.97	0.021	0.41	2.5	2.3	80	1.4	0.00558	0.81	21.52	3.43	
23/12/2005	20.05	0.025	0.35	2.5	2.5	80	2.9	0.00558	0.72	16.68	13.6	
14/12/2006	11.32	0.02	0.2	2	2	60	1.8	0.00558	0.94	7.91	2.5	
02/08/07	19.71	0.01	0.1	1.5	2	60	0.2	0.00558	0.93	6.64	1.09	
18/09/07	36.12	0.015	0.1	1.5	2	60	1	0.00558	0.94	6.47	1.28	
13 e 14/11/07	16.41	0.015	0.35	2	2	60	2	0.00558	0.9	15.5	9.89	
<b>Média</b>	<b>0.018</b>	<b>0.252</b>	<b>2.000</b>	<b>2.133</b>	<b>66.667</b>	<b>1.550</b>	<b>0.006</b>	<b>0.87</b>	<b>12.45</b>	<b>5.30</b>		

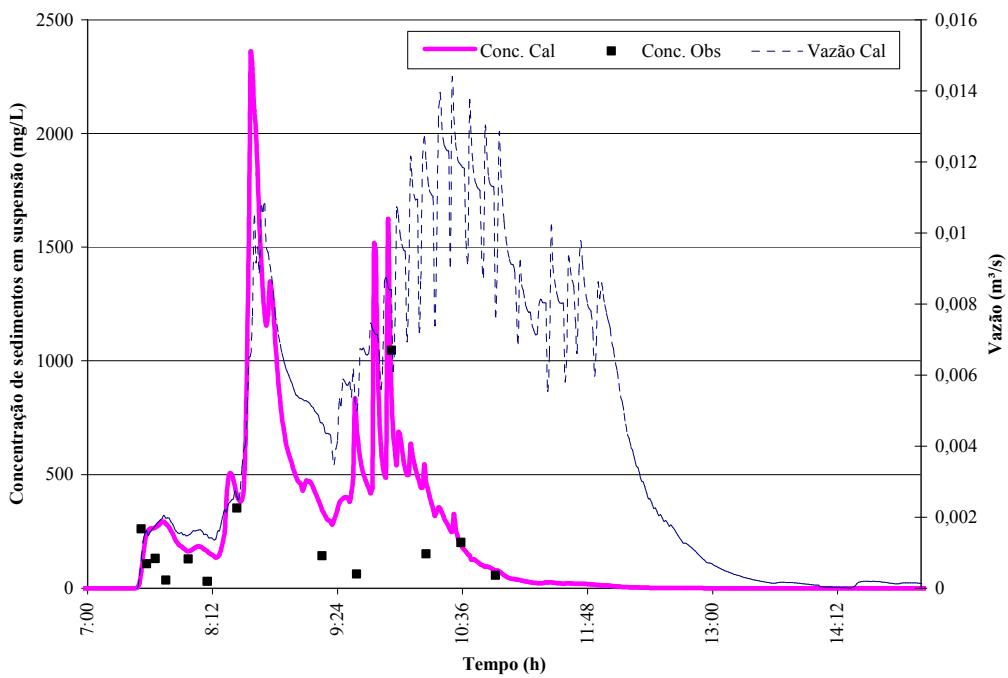
Onde: np e ni são coeficientes de rugosidade de Manning das áreas permeáveis e impermeáveis; dp (mm) e di (mm) são alturas de armazenamento das áreas permeáveis e impermeáveis; os parâmetros de infiltração de Horton onde I0 é a taxa de infiltração inicial máxima (mm/h), Ib é a taxa de infiltração mínima (mm/h) e k é a constante de decaimento (s-1); R é o coeficiente de correlação entre os valores de vazão observados e calculados; Erro (%Qp) é o erro entre a vazão de pico observada e calculada e Erro (%Vol) é o erro entre o volume total escoado observado e calculado.

### 7.3.2 Calibração do modelo SWMM – Qualidade

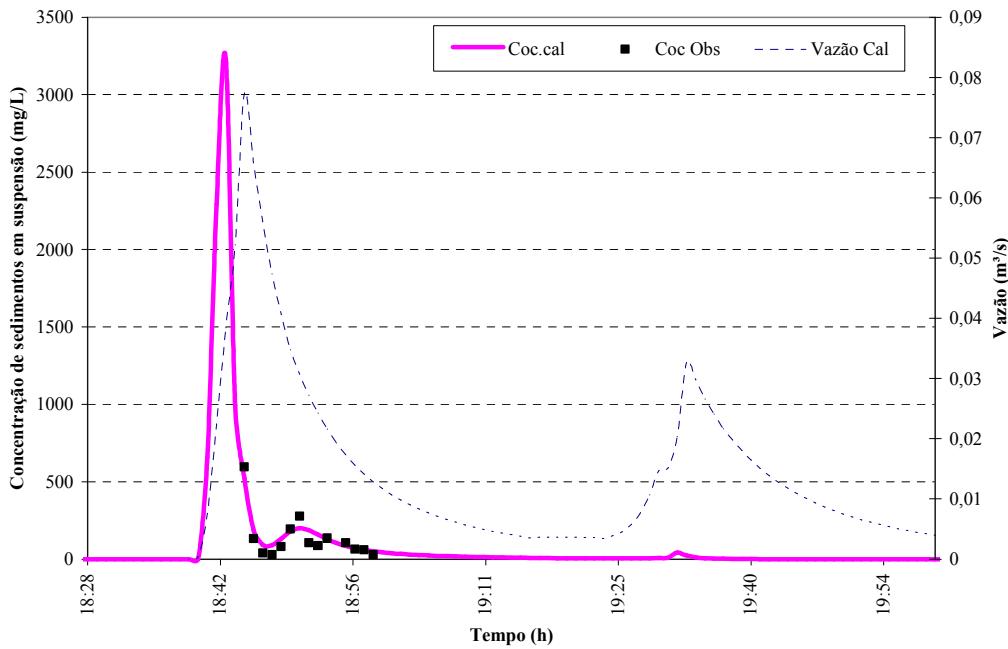
O parâmetro de qualidade simulado no módulo Runoff e Transport foi a concentração de sedimentos em suspensão, contida no escoamento, proveniente da área de contribuição. Os eventos calibrados foram os mesmos eventos simulados para o escoamento pluvial, item 7.3.1. Os resultados adquiridos na calibração obtiveram bons ajustes em relação ao coeficiente de correlação, R, que foi em média 0,87; e o erro entre os valores calculados e observados resultou em um valor médio de 36%. Os resultados apresentam-se nas figuras 7.30 a 7.35.



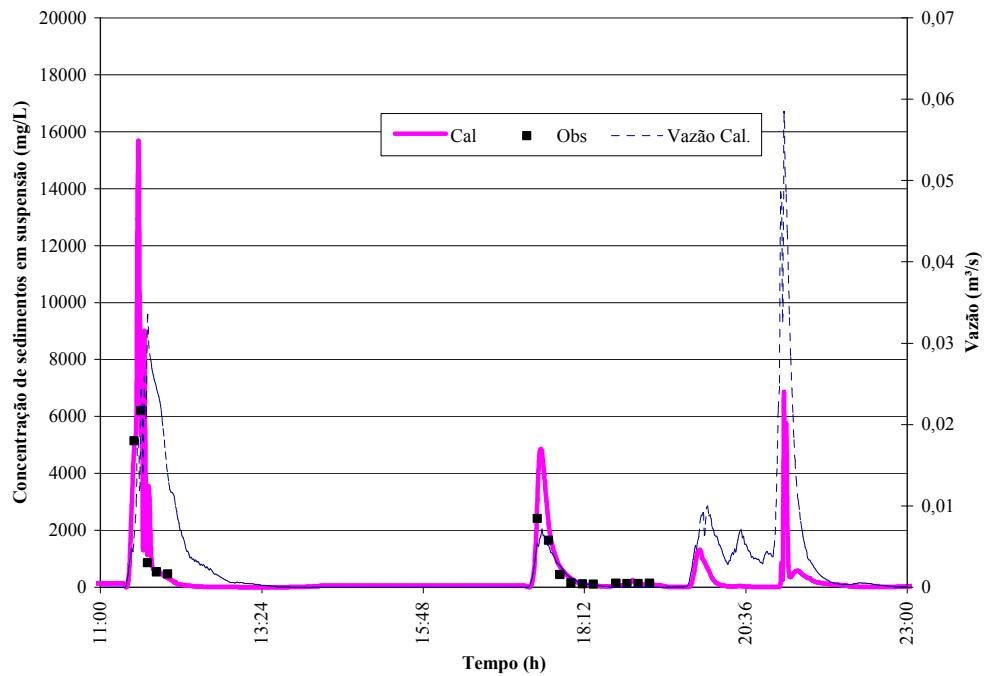
**Figura 7.30 – Evolução da concentração de sólidos suspensos para o evento 03 e 04/10/05.**



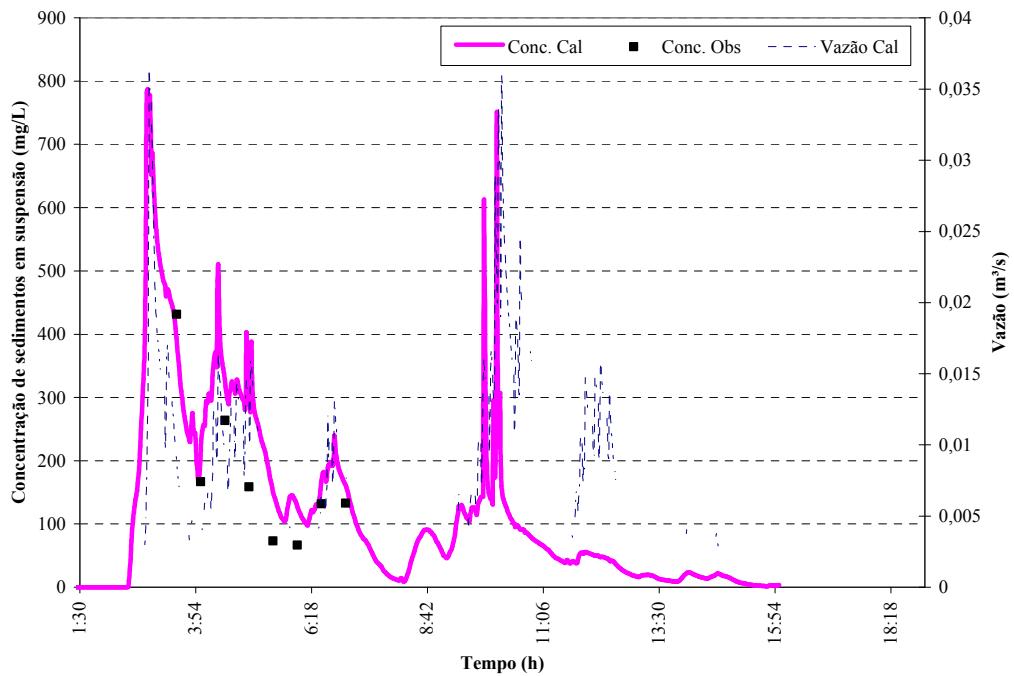
**Figura 7.31 – Evolução da concentração de sólidos suspensos para o evento 23/12/05.**



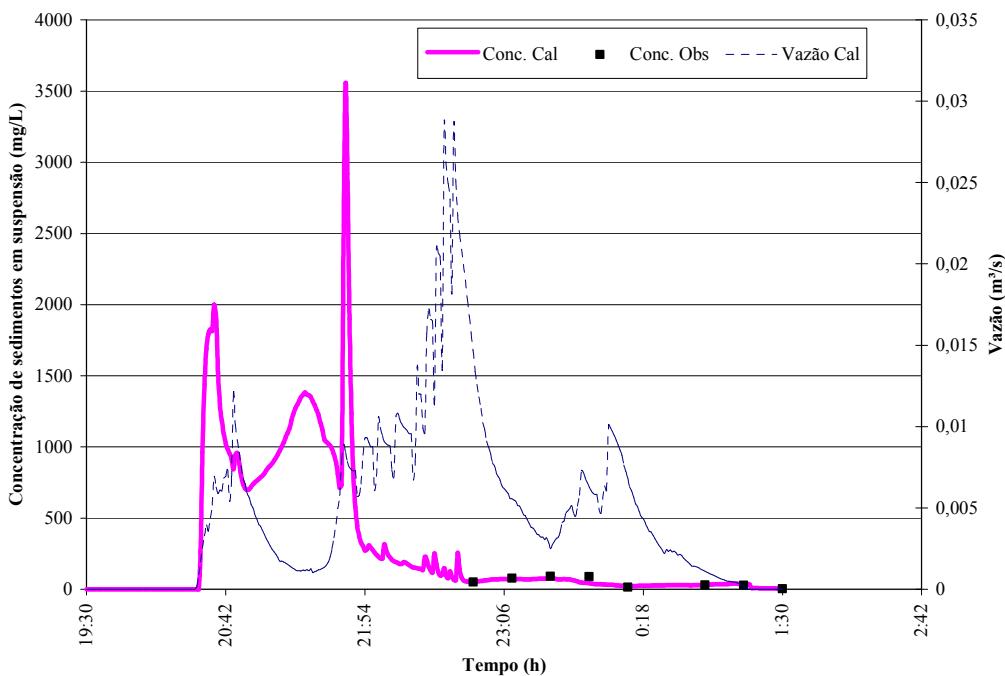
**Figura 7.32 – Evolução da concentração de sólidos suspensos para o evento 14/12/06.**



**Figura 7.33 – Evolução da concentração de sólidos suspensos para o evento 02/08/07.**



**Figura 7.34 – Evolução da concentração de sólidos suspensos para o evento 18/09/07.**



**Figura 7.35 – Evolução da concentração de sólidos suspensos para o evento 13 e 14/11/07.**

A calibração é realizada através de três processos distintos, onde dois processos são realizados no módulo Runoff e um no módulo Transport. No módulo Runoff foram calibrados os processos de deposição e transporte dos poluentes sobre a superfície em estudo, enquanto que, no módulo Transport foi calibrado o processo de transporte de sedimentos através do sistema de drenagem. A seguir são descritos os parâmetros calibrados em cada um dos três processos.

\* Calibração da função de acumulação dos poluentes.

A função exponencial de acumulação de poluentes sobre a superfície, utilizada neste estudo, possui dois principais parâmetros a serem calibrados, que são: a máxima quantidade de poluentes disponível, QFACT(1), e o coeficiente de acumulação, QFACT(2).

Os valores encontrados para a máxima quantidade de sedimentos em suspensão variaram de 19 a 210 g/m<sup>2</sup>. Este parâmetro varia muito de um evento para o outro, visto que é um parâmetro que sofre interferência de vários outros fatores como, por exemplo: a duração do período seco antecedente ao evento, surgimento de fontes extras, implementações de loteamentos, entre outros. Dotto (2006) encontrou um valor de 160g/m<sup>2</sup> de sedimentos totais em uma rua de 163,26m de comprimento para um período de 30 dias. Gomes et al. (2007) encontrou um valor de 215g/m<sup>2</sup> de sedimentos totais disponível para a mesma rua, porém, em uma época diferente. Logo, é possível se dizer que a quantidade máxima de poluentes disponível em um mesmo local não é constante, podendo sofrer grandes variações.

Para o coeficiente de acumulação os valores variaram de 0,01 a 0,45. Segundo Deletic et al. (1997), esse coeficiente de acumulação está relacionado principalmente com o uso do solo. Para esses coeficientes foram encontrados valores calibrados em diversos estudos, conforme tabela 3.2.

\* Calibração da função de transporte dos poluentes.

A função de carreamento dos poluentes utilizada pelo modelo SWMM possui dois parâmetros a serem calibrados que são: o coeficiente de carreamento, RCOEF, e o expoente em relação à intensidade de chuva, WASHPO. Os valores encontrados para o coeficiente de carreamento variaram de 0,02 a 1,5 e o expoente em relação à intensidade de chuva variou de 0,1 a 2,2.

Chen & Adams (2007), em um estudo onde simularam a concentração de sedimentos em suspensão com a utilização do modelo SWMM, encontraram valores de 0,0112 e 0,96 para o coeficiente de carreamento e para o expoente em relação à intensidade de chuva, respectivamente.

Sonnem (1980, apud James et al., 2003) calculou o valor de RCOEF, pela teoria do transporte de sedimentos, encontrando valores entre 0,052 e 6,6 e observou que o coeficiente de carreamento aumentava inversamente com o diâmetro da partícula, e diretamente com a intensidade de chuva e o tamanho da área em estudo.

\* Calibração do transporte de sedimentos através do sistema de drenagem.

A calibração do transporte de sedimentos através do sistema de drenagem envolve apenas dois parâmetros que é a gravidade específica do sedimento e a granulometria do poluente simulado. Estes parâmetros são utilizados para o cálculo do diâmetro crítico do sedimento e a quantificação da massa transportada. A densidade relativa da partícula foi calibrada para cada evento e variou entre 1,1 a 1,4.

Temprano et al. (2006) calibrou o modelo SWMM para a simulação de sólidos suspensos em um sistema de esgoto combinado e obteve um ajuste de 94%. Na calibração foi utilizado um valor fixo para a gravidade específica do sedimento de 2,65 para sólidos em suspensão.

A granulometria foi considerada para cada evento como um valor médio do sedimento seco coletado durante o período antecedente ao evento simulado. Os eventos dos dias 03 e 04/10/05 e 13 e 14/11/07 não possuíam dados de sedimentos secos antecedentes ao evento. Portanto, o valor atribuído para esses eventos foi um valor médio em relação a todos os dados coletados de sedimentos secos na rua. Os valores da granulometria utilizados em cada evento estão apresentados na tabela 6.1.

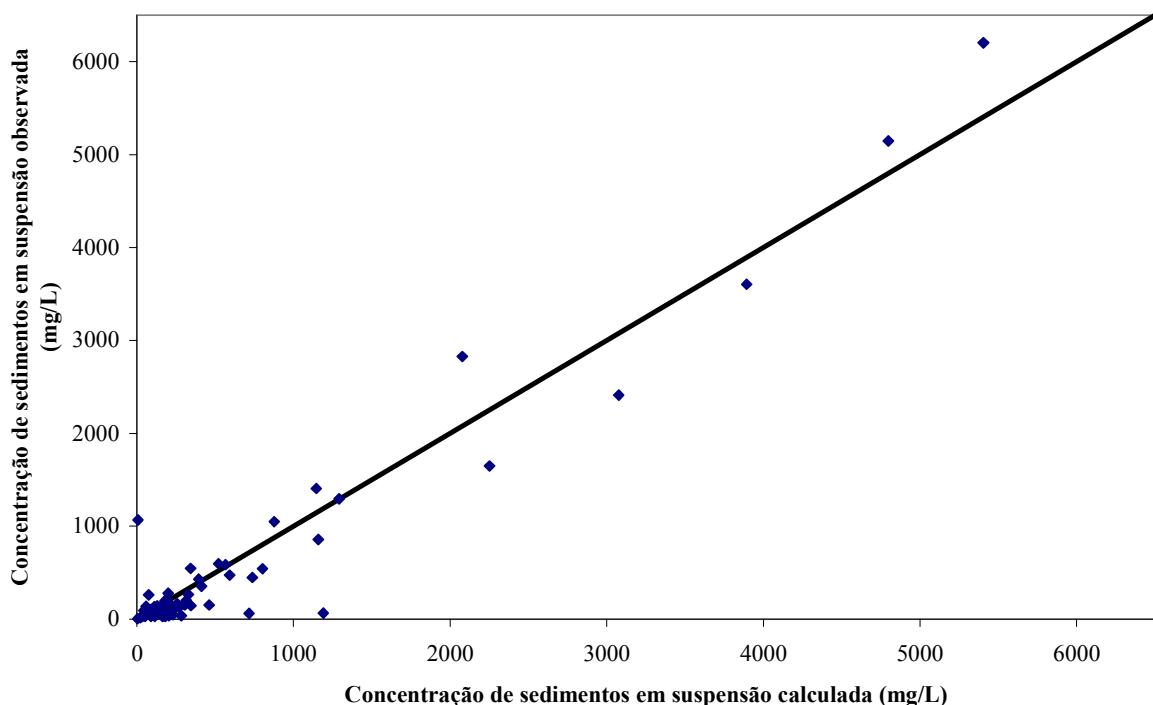
A tabela 7.5 apresenta os valores obtidos para cada parâmetro e o ajuste do coeficiente de correlação, R, e o erro entre os valores observados e calculados para cada evento.

**Tabela 7.5 – Parâmetros obtidos na calibração do modelo para a área em estudo – qualidade.**

Evento	DRYDAY dias	QFACT(1) kg/ha	QFACT(2)	WASHPO	RCOEF	SPG	R	Erro (%) Médio
03 e 04/10/05	10	2100	0.45	1.35	0.02	1.2	0.94	48
23/12/2005	15	400	0.01	2.1	0.2	1.4	0.64	48
14/12/2006	5	250	0.01	2	0.6	1.1	0.95	30
02/08/07	10	1200	0.2	2	1.5	1.3	0.93	30
18/09/07	17	200	0.04	1.1	0.1	1.4	0.91	29
13 e 14/11/07	12	190	0.02	0.1	1	1.4	0.86	30
<b>Média</b>		<b>723.33</b>	<b>0.12</b>	<b>1.44</b>	<b>0.57</b>	<b>1.30</b>	<b>0.87</b>	<b>35.83</b>

Onde: DRYDAY é o número de dias secos antecedentes ao evento; QFACT(1) é a quantidade de sedimentos disponíveis na superfície; QFACT(2) é o coeficiente de acumulação; RCOEF é o coeficiente de carreamento; WASHPO é um expoente da equação de carreamento; SPG é a gravidade específica da partícula; R é o coeficiente de correlação entre os valores observados e calculados e Erro Médio % é o erro médio entre os valores observados e calculados.

Os eventos dos dias 03 e 04/10/05 e 23/12/05 apresentaram uma maior porcentagem de erro. A figura 7.36 apresenta a variação dos valores simulados em relação aos valores observados para todos os eventos.



**Figura 7.36 – Relação entre os valores simulados pelo SWMM e os observados.**

Através do gráfico é possível observar que o modelo apresentou um bom ajuste dos valores calculados com os dados observados, para maiores concentrações de sedimentos em suspensão.

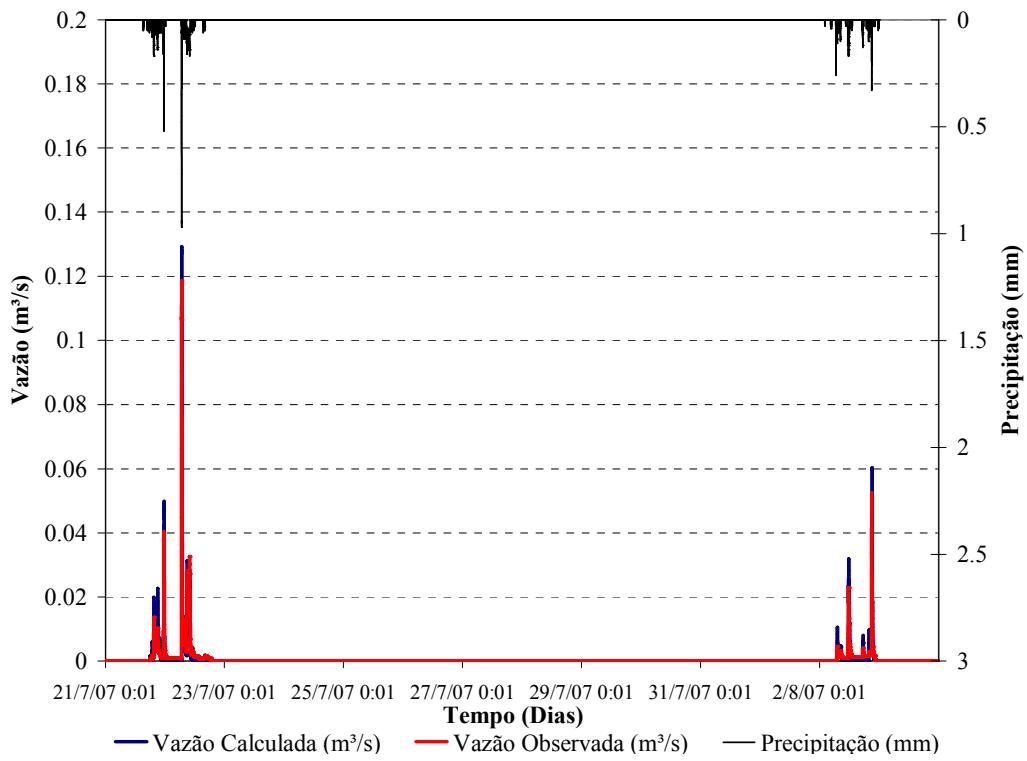
### **7.3.3 Verificação do modelo SWMM**

Foram verificados, para todos os eventos simulados, os valores médios apresentados nas tabelas 7.4 e 7.5 para o escoamento superficial e para a simulação dos sedimentos suspensos, respectivamente.

O escoamento superficial apresentou uma diminuição média no coeficiente de correlação, R, de 0,87 para 0,75. Os erros em relação à vazão de pico sofreram um aumento médio de 12,45 para 35,94% e em relação ao volume escoado ocorreu um aumento de 5,3 para 33,08 %. No entanto, esses valores apresentaram um erro significativo em relação à vazão de pico e ao volume escoado.

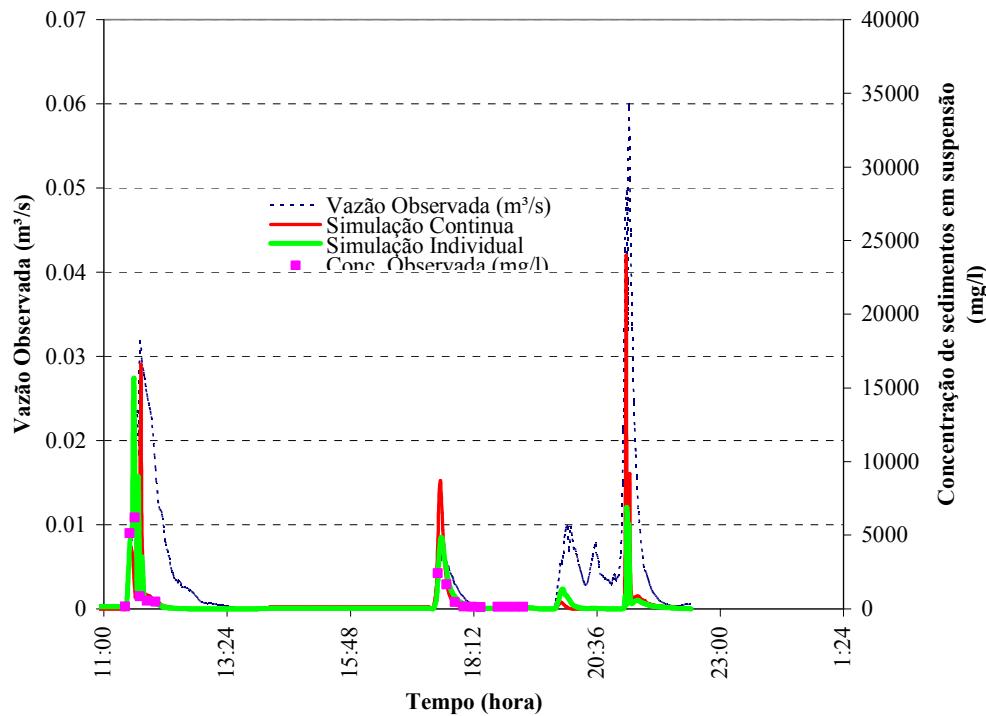
Para a qualidade do escoamento em relação ao coeficiente de correlação médio ocorreu uma diminuição de 0,87 para 0,57 e um aumento no erro médio das concentrações de sedimentos em suspensão de 36 para 91%. Em relação à qualidade do escoamento ocorreu um erro bastante significativo para a concentração média dos sedimentos em suspensão. O erro ocorrido na simulação do escoamento superficial com os valores médios contribuiu para um maior erro na simulação da concentração de sedimentos em suspensão, uma vez que o cálculo da concentração leva em conta o valor da descarga líquida.

Um fator desconhecido na simulação em relação à qualidade do escoamento é a quantidade de poluente remanescente de um evento no sistema de drenagem, que irá contribuir para o próximo evento como carga disponível dentro das canalizações. Nesse sentido, foi analisado o evento do dia 02/08/07 para verificar a influência da carga remanescente do evento anterior a este. O gráfico 7.37 apresenta a vazão observada e calculada entre os dias 21/07/07 a 02/08/07.



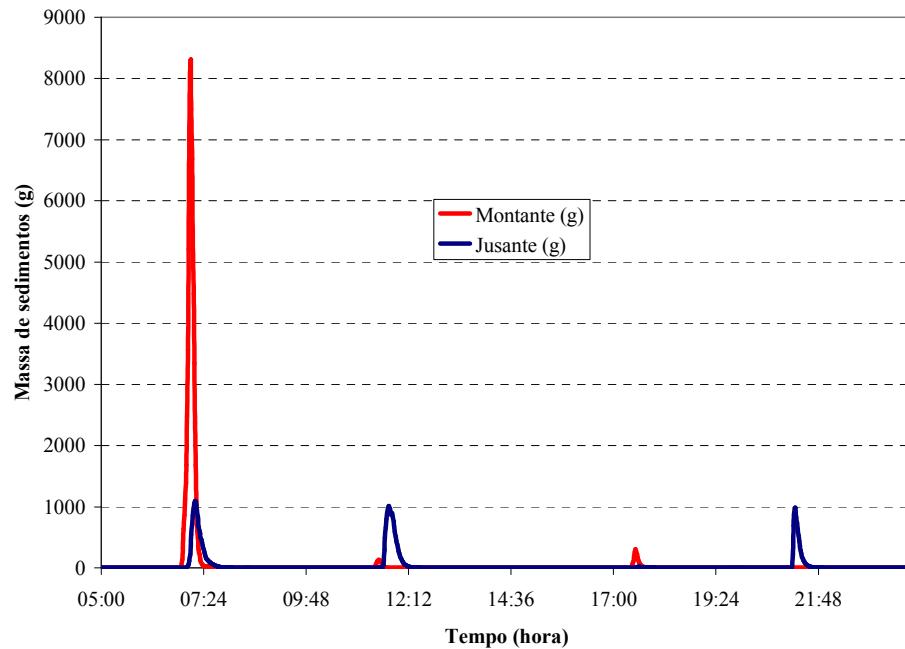
**Figura 7.37 – Simulação contínua entre os dias 21/07/07 a 02/08/07.**

A simulação contínua entre os dias 21/07/07 a 02/08/07 apresentou uma pequena diferença em relação ao evento do dia 02/08/07 quando simulado individualmente. Em relação à vazão de pico ocorreu um aumento de 6% e o volume de 5%. A figura 7.38 apresenta a concentração de sedimentos em suspensão para o evento do dia 02/08/07 com simulação contínua e individual.

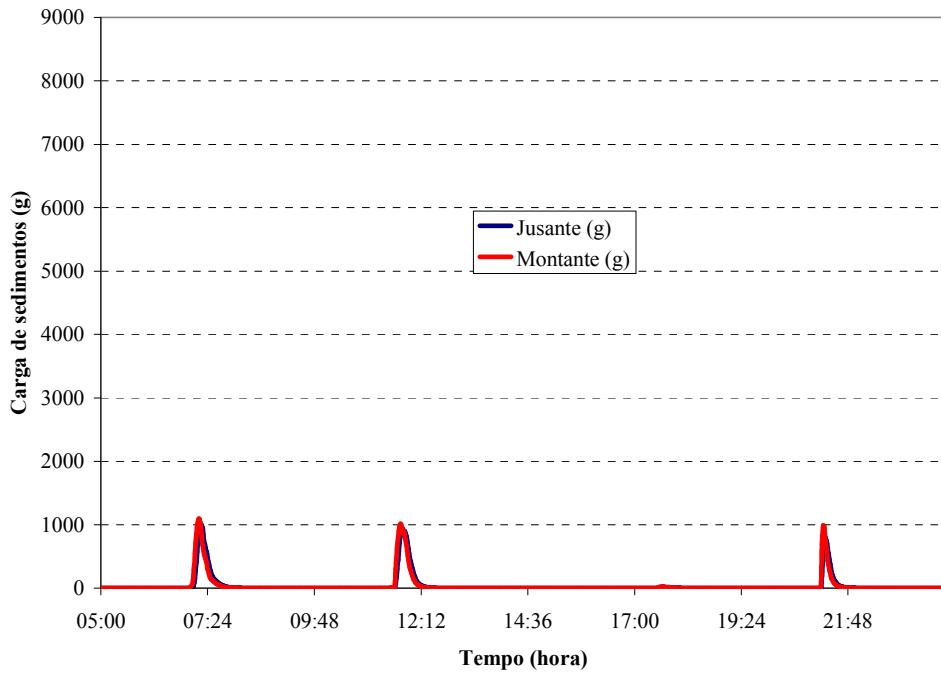


**Figura 7.38 – Simulação contínua e individual do evento do dia 02/08/07.**

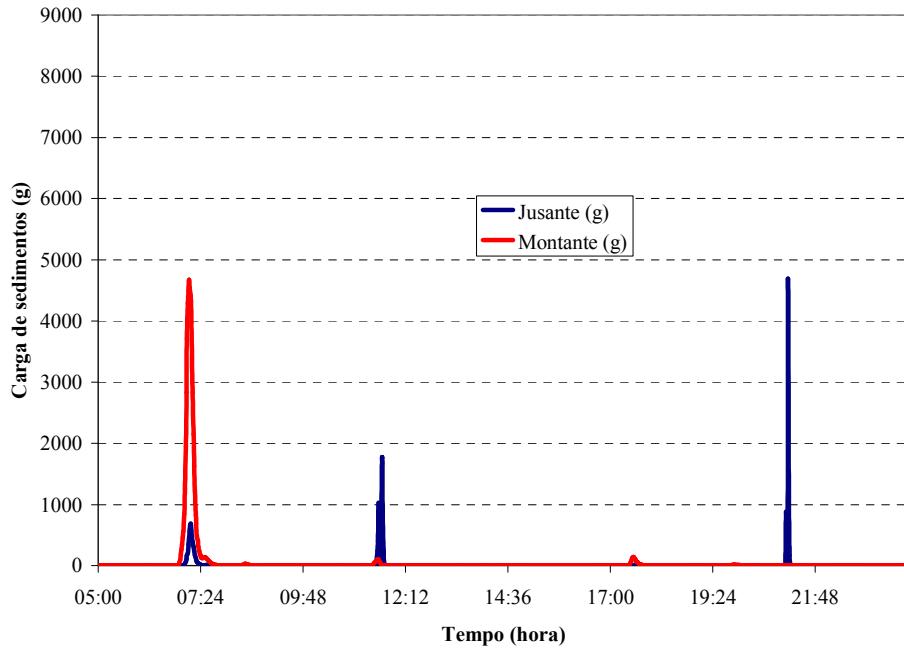
Para as concentrações de sedimentos em suspensão ocorreu um aumento do erro médio de 30 para 38%, na simulação contínua, em relação às concentrações observadas. Os gráficos 7.39 a 7.43 apresentam a quantidade de sedimentos a montante e a jusante em cada conduto para o evento do dia 02/08/07 simulado individualmente.



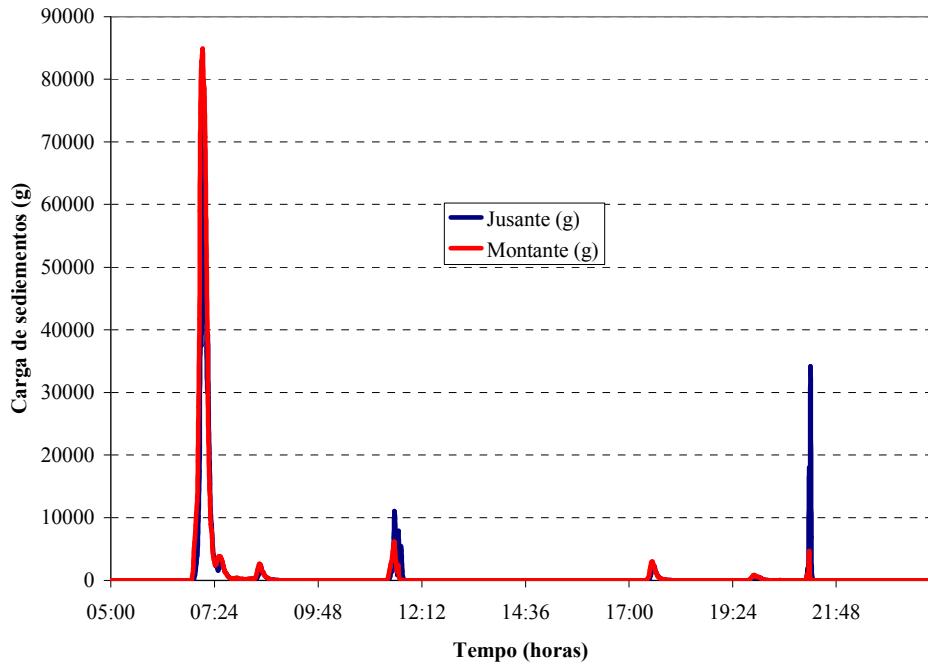
**Figura 7.39 - Carga a montante e a jusante no conduto 10.**



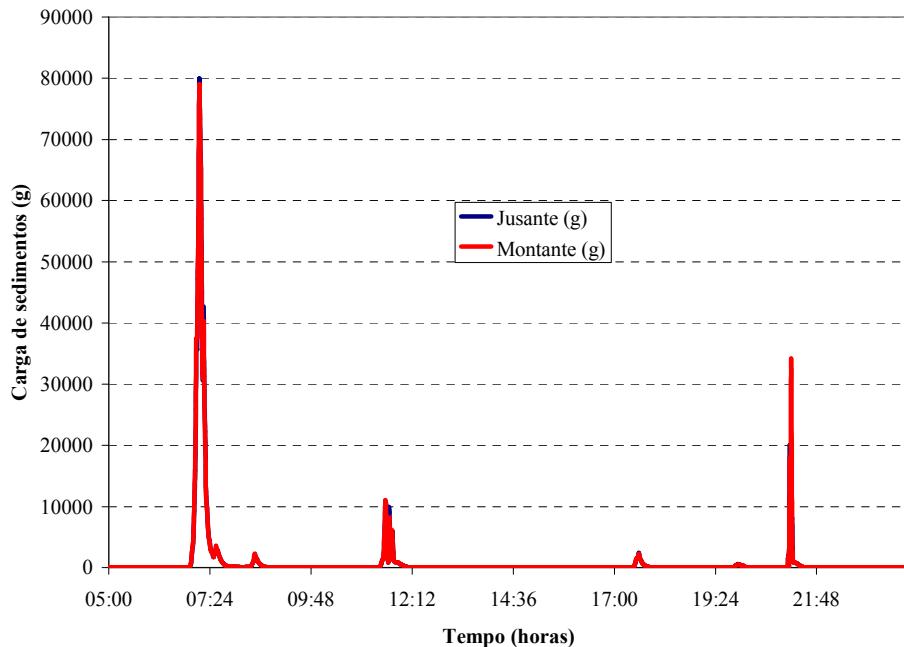
**Figura 7.40 - Carga a montante e a jusante no conduto 20.**



**Figura 7.41 - Carga a montante e a jusante no conduto 30.**



**Figura 7.42 - Carga a montante e a jusante no conduto 40.**



**Figura 7.43 – Carga a montante e a jusante no conduto 50.**

As tabelas 7.6 e 7.7 apresentam à quantidade da carga de sedimento que esteve a montante a jusante e retido dentro da rede de drenagem, para o evento do dia 02/08/07, com simulação continua e individual respectivamente.

**Tabela 7.6 – Simulação continua - carga de sedimentos em suspensão a montante, jusante e depositada.**

<b>Conduto</b>	<b>Montante (kg)</b>	<b>Jusante (kg)</b>	<b>Depositado (kg)</b>
10	80.29	48.05	32.24
20	48.05	48.04	0.01
30	58.72	19.96	38.76
40	1201.22	944.23	256.99
50	992.27	989.52	2.75

**Tabela 7.7 – Simulação individual - carga de sedimentos em suspensão a montante, jusante e depositada.**

<b>Conduto</b>	<b>Montante (Kg)</b>	<b>Jusante (Kg)</b>	<b>Depositado (Kg)</b>
10	79.61	41.56	38.05
20	41.56	41.54	0.02
30	58.19	18.86	39.33
40	1188.45	962.68	225.77
50	1004.22	989.27	14.94

Através das tabelas é possível concluir que a quantidade de sedimentos retida dentro da rede de microdrenagem foi de 330,75kg e de 318,12kg para a simulação contínua e individual respectivamente. Logo a quantidade de sedimentos remanescente contribui em 12,63 kg de sedimentos a mais retida dentro das canalizações. Em relação à descarga sólida total a simulação contínua apresentou 250g a mais do que a simulação individual. É possível observar também que o conduto 40 apresentou uma deposição de aproximadamente de 71 % da carga total depositada, isto porque esse conduto drena 94 % da área total. Os condutos 10 e 30 apresentam uma deposição de aproximadamente 12 % da carga total depositada em ambos os condutos.

Foi feita uma verificação da aplicação das equações 7.3, obtida no item 7.2.1 e 3.6 adquirida por Dotto (2006), descrita no item 3.6, para o cálculo da descarga sólida. Os valores resultantes dessas equações foram comparados com os valores obtidos pelo modelo. Os parâmetros usados no modelo foram os valores médios. A tabela 7.8 apresenta o coeficiente de correlação e o erro médio entre os valores observados e os valores calculados.

**Tabela 7.8 – Verificação das equações de descarga sólida e o modelo SWMM.**

<b>Método</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>Erro (g/s)</b>
Equação Proposta	0.66	0.4
Dotto (2006)	0.66	4.24
SWMM	0.69	0.77

Através da tabela é possível verificar que a equação proposta nesse estudo apresentou um bom ajuste, mas o seu uso é limitado somente para a área em estudo não podendo ser extrapolada para outro local. Os valores obtidos pela equação proposta por Dotto (2006) apresentaram um bom coeficiente de correlação, porém, um maior erro entre os dados calculados e observados. O modelo SWMM apresentou um bom ajuste em relação ao coeficiente de correlação e uma pequena diferença entre os valores médios observados.

A equação obtida nesse estudo e a equação proposta por Dotto (2006) para a determinação da descarga sólida poderiam ser usadas como uma curva chave para a determinação da concentração de sedimentos em suspensão para a área em estudo. Porém, pelo número limitado de eventos monitorados não foi possível se fazer uma maior verificação dessas equações para seu uso como uma curva chave de sedimentos.

O modelo SWMM possui uma maior vantagem na determinação da descarga sólida do que as equações apresentadas anteriormente. O modelo considera diversos fatores que interferem na determinação da descarga sólida como, por exemplo, a intensidade da chuva, as condições do escoamento, a quantidade de sedimentos disponível; e não somente a descarga líquida. Além disso, o modelo SWMM pode ser aplicado a outras áreas, no entanto, é preciso observar que os parâmetros ajustados consideram as características da área em estudo e dos eventos analisados sendo obtido para cada caso em estudo.

Foi verificada também a adoção de um valor médio para a granulometria do sedimento, em todos os eventos simulados. O valor médio considerado para essa verificação foi a média encontrada em relação aos cinco períodos coletados neste estudo. Valores esses que foram utilizados na simulação dos eventos 03 e 04/10/05 e 23/12/05, por não possuírem dados observados nos dias secos antecedentes. O resultado desta verificação demonstrou que o valor médio adotado não alterou os resultados finais, isto pode ter ocorrido por a granulometria média possuir uma grande similaridade em relação à granulometria dos dias anteriores aos eventos. Logo a adoção de uma granulometria média seria representativa para a simulação dos eventos em relação a concentração de sedimentos em suspensão.

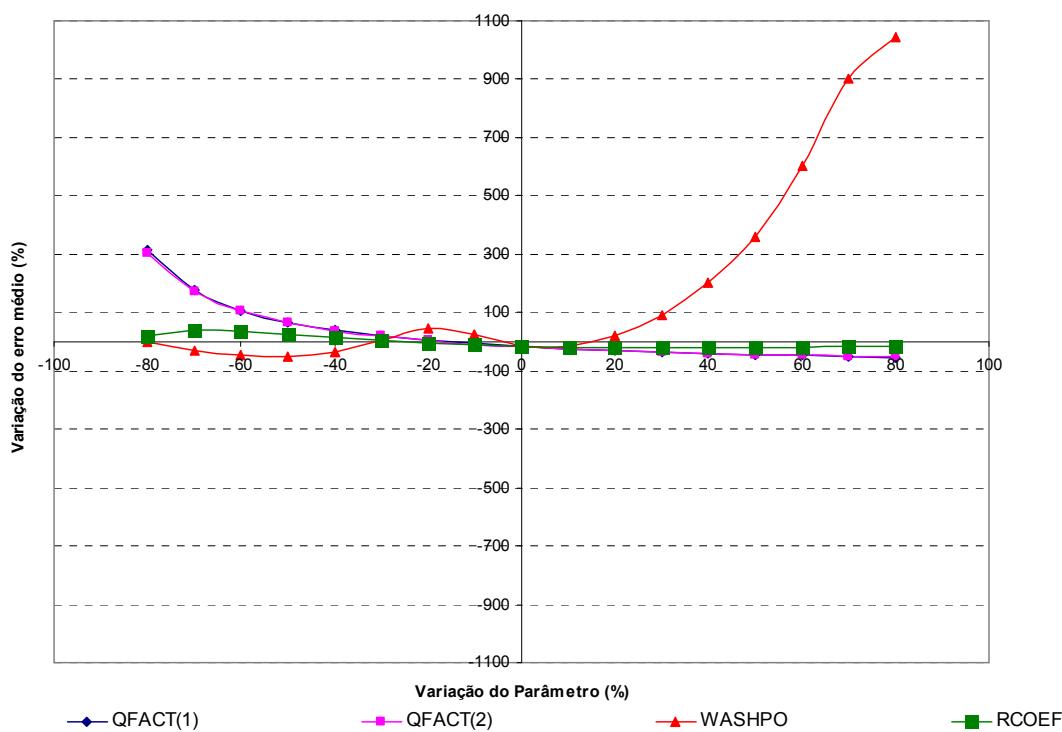
### **7.3.4 Análise de sensibilidade**

A análise de sensibilidade realizada para os parâmetros, em relação a concentração de sedimentos em suspensão, dos módulos Runoff e Extran, apresentada a seguir, buscou avaliar a influência dos parâmetros no erro médio entre os valores simulados e observados para o

aplicativo SWMM. O objetivo principal desta análise foi de observar a influência dos parâmetros para a área em estudo.

#### 7.3.4.1 Sensibilidade dos parâmetros do módulo Runoff

Para o módulo Runoff os parâmetros que apresentaram maior sensibilidade, em relação ao erro médio entre os valores simulados e calculados e a variável estudada foram: a máxima quantidade de poluentes disponível (QFACT(1)), coeficiente de acumulação (QFACT(2)) e o expoente da equação de transporte de sedimentos (WASHPO). O parâmetro do coeficiente de carreamento (RCOEF) não apresentou grande influência sobre o erro médio entre os valores simulados e observados. A figura 7.44 mostra a influência dos parâmetros analisados do módulo Runoff.



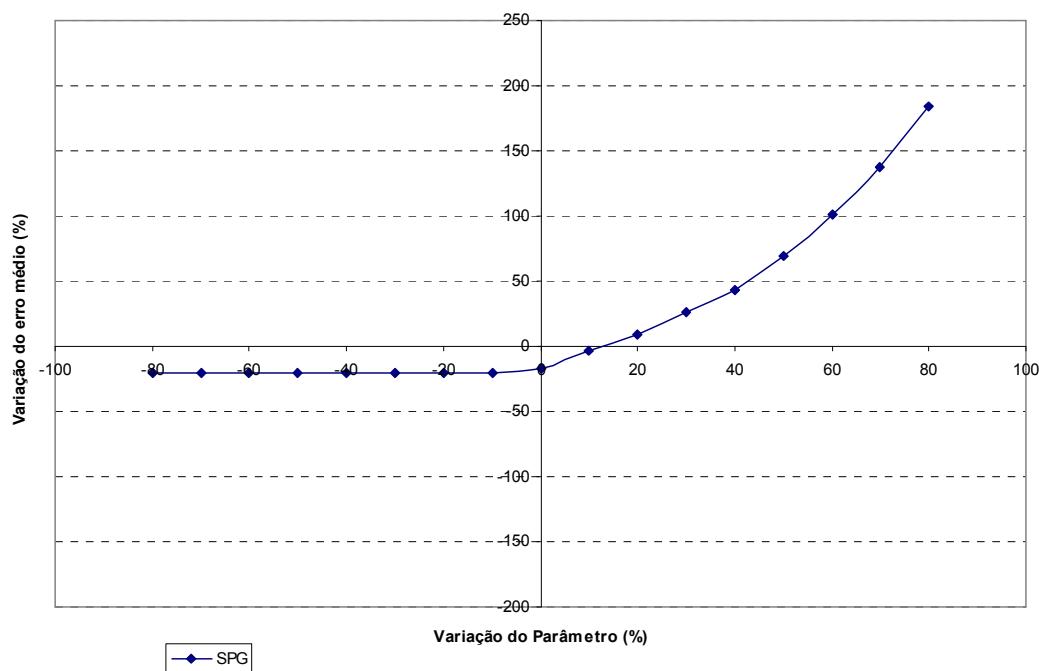
7.44 – Influência dos parâmetros de qualidade no módulo Runoff no erro médio.

Os parâmetros relacionados com a acumulação dos sedimentos sobre a superfície apresentaram maior sensibilidade para os valores menores da máxima quantidade de poluentes disponível (QFACT(1)) e do coeficiente de acumulação (QFACT(2)).

O expoente da equação de transporte de sedimentos (WASHPO) causa aumento do erro médio, quando seu valor é aumentado.

### 7.3.4.2 Sensibilidade do parâmetro do módulo Transport

Para o módulo Transport o parâmetro relacionado a densidade do sedimento (SPG), apresentou maior sensibilidade, em relação ao erro médio entre os valores simulados e observados, quando seu valor era aumentado. A figura 7.45 mostra a influência do parâmetros analisados no módulo Transport tendo o erro médio como variável dependente.



7.45 - Influência dos parâmetros de qualidade no módulo Transport no erro médio.

## 8. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A presente pesquisa teve por objetivo contribuir para um melhor entendimento do processo de acumulação e propagação de sedimentos em uma rede de microdrenagem. O enfoque foi quantificar a carga de sedimentos desde a origem, em sarjetas de ruas asfaltadas, até a chegada ao corpo receptor, através do escoamento pluvial. As análises foram feitas através de monitoramento hidrológico, sedimentológico e modelagem com o modelo SWMM.

O monitoramento hidrológico e sedimentológico foram realizados entre novembro de 2006 a outubro de 2007. As coletas de sedimentos secos nas sarjetas foram realizadas durante cinco períodos distintos de amostragens com uma duração média de 30 dias.

No primeiro e no segundo período, o monitoramento foi realizado em 2 zonas de amostragem, sendo coletado intercalando os lados da rua sem repetição da superfície. No terceiro, quarto e quinto período, o monitoramento foi realizado em 3 zonas de amostragem, intercalando o lado da rua e sem repetições das superfícies e, também, em uma mesma superfície diariamente do lado direito e esquerdo da rua. Dessa forma, foi possível perceber que a distribuição de sedimentos sobre a superfície da rua não é uniforme e que sofre intervenção de vários fatores tais como: velocidade e sentido do vento, intensidade de tráfego, intensidade e duração da precipitação, entre outros. Foi possível verificar, também, que o lado direito da rua possuía uma maior carga de sedimentos que o lado esquerdo, contribuindo, assim, para uma maior desuniformidade.

Os eventos de precipitação, na maioria das vezes, reduzem a quantidade total de sedimentos contida na superfície. Considerando pontualmente, a carga de sedimentos pode aumentar ou diminuir após um evento de precipitação, dependendo da capacidade de transporte do escoamento.

A carga total de sedimentos sofre influência em relação ao sentido do vento. No caso da Rua Marquês do Herval, o vento nos sentidos NW (noroeste) e SE (sudeste) apresentam uma maior influência devido a estes sentidos serem paralelos ao sentido longitudinal da rua.

As granulometrias do sedimento seco apresentaram um diâmetro médio de 0,442mm.

A aplicação da equação proposta por Sartor and Boyd (1972 e 1974) apud. Deletic et al. (1997) apresentou resultados satisfatórios, porém, seu uso é limitado, uma vez que a carga total disponível é um valor bastante variável de um período para outro.

As coletas de amostras líquidas foram realizadas durante alguns eventos de precipitações, que tiveram o objetivo de determinar a concentração de sedimentos em suspensão, provenientes do escoamento pluvial. A concentração de sedimentos em suspensão

apresentou uma variação entre 3,5 e 6205 mg/L durante os eventos monitorados, demonstrando uma grande variabilidade dos valores obtidos.

O modelo SWMM foi utilizado para avaliar os parâmetros envolvidos na estimativa de cheias e da qualidade das águas do escoamento. O nível de discretização em 3 subáreas foi adotado para a área em estudo, com base no sistema de drenagem, que se mostrou representativo em relação às condições existentes.

Para a simulação foram selecionados 6 eventos. Os resultados obtidos na calibração dos parâmetros em relação ao escoamento pluvial apresentaram um coeficiente de correlação médio de 0,87 e erros médios, na vazão de pico e volume escoado, de 12,45% e 5,30% respectivamente, para os eventos simulados.

Em relação aos parâmetros calibrados para a simulação da concentração de sedimentos em suspensão, o coeficiente de correlação médio obtido foi de 0,87 e o erro médio absoluto, entre os valores calculados e observados, foi de 36%.

Foram verificados os valores médios obtidos para os parâmetros referentes ao escoamento pluvial e a qualidade do escoamento para todos os eventos simulados. Os parâmetros médios verificados para o escoamento pluvial apresentaram um coeficiente de correlação médio de 0,75 e um erro médio na vazão de pico e volume escoado de 35,94% e 33,08%, respectivamente. Em relação à qualidade do escoamento, os parâmetros médios apresentaram um coeficiente de correlação médio de 0,57 e um erro médio absoluto de 91%, entre os valores calculados e observados.

Para a qualidade da água do escoamento, o erro apresentou um erro significativo porque sofreu influência da descarga líquida.

Foi verificada a influência da carga residual dentro da rede de microdrenagem do evento antecedente ao evento do dia 02/08/07, o qual contribuiu para um acréscimo de 250g na carga final de sedimentos em suspensão. Este valor pode sofrer variações dependendo do evento, podendo ser também significativo para uma área maior de contribuição.

A equação de descarga sólida apresentada neste estudo apresentou bons resultados para eventos de precipitação menores que 40mm, porém, devido a pouca quantidade de dados disponíveis, não pode ser verificada para eventos maiores. O modelo SWMM apresentou um maior erro entre os valores calculados e observados para a descarga sólida do que a equação obtida neste estudo, no entanto, o modelo é mais representativo por considerar diversos outros fatores que interferem na descarga sólida como, por exemplo, a intensidade de chuva, e não somente a vazão.

Através deste estudo, foi possível perceber que a carga poluidora lançada no corpo receptor varia muito e depende de fatores como: intensidade da chuva, duração do evento, tamanho da área de contribuição e outros fatores que tornam a relação vazão x carga poluidora difícil de ser estabelecida.

Na análise da sensibilidade do módulo Runoff, para a qualidade do escoamento superficial em relação a concentração de sedimentos em suspensão, os parâmetros que apresentaram maior sensibilidade, foram: a máxima quantidade de poluentes disponível (QFACT(1)), coeficiente de acumulação (QFACT(2)) e o expoente da equação de transporte de sedimentos (WASHPO). O coeficiente de carreamento (RCOEF) não apresentou grande influência sobre o erro médio entre os valores simulados e observados.

No módulo Transport, o parâmetro que apresentou maior sensibilidade à qualidade do escoamento superficial em relação à concentração de sedimentos em suspensão foi a densidade do sedimento (SPG), tendo maior sensibilidade para valores altos de SPG.

O modelo SWMM, utilizado para a avaliação do escoamento pluvial e da qualidade da água relacionada ao sedimento, apresentou boa representação para a simulação na rede de microdrenagem. Assim, a simulação numérica pode ser usada como uma ferramenta tanto para o planejamento de projetos de drenagem urbana como para a avaliação dos impactos decorrentes, a fim de obterem-se soluções mitigadoras para a minimização desses poluentes.

Para futuros trabalhos na área de estudo, sugere-se:

- Continuidade do monitoramento na mesma área em estudo, para que se tenha uma melhor representatividade da carga de sedimentos proveniente da microdrenagem;
- Aplicação do SWMM para outros locais diferentes;
- Aplicação do SWMM para outros tipos de poluentes.

## **9. REFERÊNCIAS**

ALLEY W.M. Estimation of impervious-area washoff parameters. Water Resources Research., v. 17, n. 4, 1981.

ALLEY W. M. & SMITH, P. E. Estimation of accumulation parameters for urban runoff quality modeling. Water Resources Research., v. 17, n. 6, 1981.

BASTOS, G.A.P. Análise dos parâmetros do modelo swmm para avaliação do escoamento em duas bacias periurbanas em Santa maria - RS. 2007. 169f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

BRANCO N.; PAIVA, J.B.D; PAIVA, E.M.C.D. Produção de sedimentos da bacia hidrográfica do arroio Vacacaí-Mirim - Avaliação preliminar. In: XVII Congresso Nacional del Agua e II Simposio de Recursos Hídricos del CONESUR, Santa Fe, Argentina, p. 444-451, 1998.

BUTLER, D.; THEDCHANAMOORTHY, S.; PAYNE, J.A. Aspects of surface sediment characteristics on an urban catchment in London. Water Science Technology.v. 25, n. 8, p. 13-19, 1992.

CARVALHO, N.O. Hidrossedimentologia Prática, CPRM, ELETROBRÁS, 1994.

CARVALHO, N.O.; FILIZOLA N.P.J.; SANTOS, P.M.C; LIMA, J.E.F.W. Guia de práticas sedimentométricas. Agência Nacional de Energia Elétrica, Superintendência de estudos e informações Hidrológicas, 154 p. 2000.

CHARBENEAU R.J. & BARRETT M. E. Evaluation of methods for estimating stormwater pollutant loadings. Water Environment Research. v. 70, n. 7, 1998.

CHEN, J. & ADAMS, B. J. A derived probability distribution approach to stormwater quality modeling. Advances in Water Resources. v. 30, p. 80-100, 2007.

CHOI, K. & BALL, J. E. Parameter estimation for urban runoff modeling. *Urban Water.* v.4, p. 31-41, 2002.

DELETIC, A.; ASHLEY, R.; REST, D. Modelling input of fine granular sediment into drainage systems via gully-pots. *Water Research.* v. 34, n. 15, p. 3836-3844, 2000.

DELETIC, A.; MAKSIMOVIC, C.; IVETIC, M. Modelling of storm wash-off of suspended solids from impervious surfaces. *Journal of Hydraulic Research.* v. 35, n. 1, p. 99-118, 1997.

DOTTO, C.B.S.; PAIVA, E.M.C.D.; SILVA, L.F. Acumulação e caracterização dos sedimentos em superfícies asfálticas de área urbana em Santa Maria-RS. In: VII Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos, 2006, Santa Maria. Sedimentos: o Desafio da Multidisciplinaridade. Porto Alegre : ABRH, 2006.

DOTTO, C.B.S. Avaliação e Balanço de Sedimentos em Superfícies Asfálticas em Área Urbana de Santa Maria – RS. UFSM – Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil. 126p. Dissertação de Mestrado. Santa Maria, 2006.

DOTTO, C. B. S. ; PAIVA, E. M. C. D. ; SILVA, L. F. ; MARTINS, M. B. Caracterização dos sedimentos propagados na rede de drenagem em área urbana de Santa Maria-RS. In: I Simpósio de Recursos Hídricos do Sul-Sudeste, 2006, Curitiba. I Simpósio de Recursos Hídricos do Sul-Sudeste. Curitiba : ABRH, 2006. v. 1, p. 1-16.

DOTTO, C.B.S.; PAIVA, E.M.C.D.; SILVA, L.F. Acumulação e balanço de sedimentos em superfícies asfálticas em área urbana de Santa Maria - RS.. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 12, p. 1-11, 2007

EPA. Preliminary Data Summary of Urban Storm Water Best Management Practices. EPA-821-R-99-012. Office of Water (4303). Washington, 1999.

GARCIA, J.I.B. Monitoramento Hidrológico e Modelagem da Drenagem Urbana da bacia Hidrográfica do Arroio Cancela. 2005. 169f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

GARCIA, J.I.B.; PAIVA, E.M.C.D. Monitoramento hidrológico e modelagem da drenagem urbana da bacia do Arroio Cancela - RS. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, v. 11, p. 1-10, 2006.

GOMES, A. P. ; SILVA, L. F. ; PAIVA, E. M. C. D. . Estudo da propagação de sedimentos em ruas asfaltadas.. In: XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos e 8 Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa, 2007, São Paulo. Gestão de Recursos Hídricos, Integração de Políticas e Sustentabilidade do Meio Ambiente Urbano.. Porto Alegre : ABRH, 2007. v. 1. p. 1-15.

HUBER, W. C., Dickinson, R.E. Stormwater management model Version 4, User's Manual, EPA-600/3-88-001a. Athens (GA): US EPA; 1988.

JAMES, W.; HUBER, W. C.; DICKINSON, R. E.; PITI, R. E.; JAMES, W. R. C.; ROSENER, L. A.; ALDRICH, J. A., User's Guide to SWMM, publicado por CHI, Guelph, Ontario, Canada, 2003.

JI, Z. General Hydrodynamic Model for sewer/channel networks systems. Journal of Hydraulic Engineering. / Reston. v.124, n.3, p.307-315, 1998.

MAKSIMOVIC, C. General Overview of Urban Drainage Principles and Practice. Urban Drainage in Specific Climates (IHP-V-Technical Documents in Hydrology). Paris: UNESCO, Vol.1, n.40, p.1-21, 2001.

MARTINS, E.S.P.R.; PAIVA, J.B.D. Quantidade dos recursos hídricos. In: PAIVA, J.B.D.; PAIVA, E.M.C.D. (Org.). Hidrologia Aplicada à Gestão de Pequenas Bacias Hidrográficas. Editora ABRH, p.531-566. Porto Alegre, 2001.

MATOS, J.S.; DAVID, L.M.; PAVÃO, L. Qualidade de escorrências pluviais em zonas urbanas e impacte em meios receptores. In: 8 Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 8, 1998, João Pessoa. Rio de Janeiro: ABES, 1998, v.2, p.334-347.

MELLER, A.; PAIVA, E.M.C.D. Simulação hidrodinâmica 1D de inundações em sistema de drenagem urbana. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 12, p. 1-11, 2007.

MELLER, A. Simulação Hidrodinâmica Integrada de Sistema de Drenagem em Santa Maria-RS. UFSM – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. 164p. Dissertação de Mestrado. Santa Maria, 2004.

MENEZES, F. L.; ROSSO, T.C.A. (2007). “Avaliação da qualidade de águas de drenagem urbana correlacionada aos poluentes originados pelo tráfego de veículos automotores.” em Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos.

MUTHUKARUPPAN, M., CHIEW, F.H.S. AND WONG, T. (2002) Size distribution and partitioning of urban pollutants. Global Solutions for Urban Drainage, 2002. (CD-ROM).

MEYER, L. D. 1971. Soil Erosion by Water on Upland Áreas. In: SHEN, H. W. Ed.Rivers Mechanics. Fort Collins. V.2 , chap 27.

NASCIMENTO, N.O. Prospecção Tecnológica. Recurso Hídricos. Anexo II – c. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos. UFMG. p. 42. 2003.

PAZ, M.F.; GASTALDINI, M.C.C.;JORGE, M.P. (2004). “Avaliação da qualidade do escoamento superficial da bacia alto da colina” in Anais do XI Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia, Rio de Janeiro RJ, Brasil.

PORTE, M.F.A. Aspectos Qualitativos do Escoamento Superficial em Áreas Urbanas. In: Tucci,C.E.M.; Porto, R.L.L.; Barros, M.T. Drenagem Urbana. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS/ABRH, 1995, V.5, p.387-414.

TEMPRANO, J.; ARANGO, O.; CAGIAO, J.; SUÁREZ, J.; TEJERO, I. Stormwater quality calibration by SWMM: A case study in Northern Spain. Water SA Vol. 32. n. 1. 2006.

TUCCI, C. E. M., Gerenciamento Integrado das Inundações Urbanas no Brasil, In: Revista de Gestão de Água da América Latina REGA Vol. 1, n. 1 p.59-73, 2004.

TUCCI, C. E. M. Inundações Urbanas. Impactos da Urbanização. Porto Alegre: Ed. ABRH/RHAMA, 2007, p. 87 – 124.

TUCCI, C.E.M. Inundações Urbanas. In: Tucci,C.E.M.; Porto, R.L.L.; Barros, M.T. Drenagem Urbana. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS/ABRH, 1995, V.5, p.15-36.

TUCCI, C.E.M. Inundações Urbanas. In: Tucci,C.E.M.; Porto, R.L.L.; Barros, M.T. Drenagem Urbana. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS/ABRH, 1995, V.5, p.390-393.

VAZE, J.; CHIEW, F.H.S. Experimental study of pollutant accumulation on an urban road surface. *Urban Water.* v. 4, n. 4, p 379-389, 2002.

VAZE, J.; CHIEW, F.H.S. Study of pollutant washoff from small impervious experimental plots. *Water Resour. Res.* 39(6):[np]. 2003.

ZAGHLOUL, N. A., Sensitivity analysis of the SWMM Runoff-Transport parameters and the effects of catchment discretisation *Adv. Water Resources*, Volume 6, 1983.

## APÊNDICES

**APÊNDICE A – TABELAS DE COLETA DE SEDIMENTO SECO**

**Tabela A1 – Precipitação e carga de sedimentos – Primeiro período de amostragem em duas zonas.**

Data	P (mm)	Carga de sedimentos (g/m <sup>2</sup> )		
		Livre total	Fixa Total	Total
29/11/06		60,26	29,77	90,03
30/11/06				
01/12/06		48,13	5,78	53,91
02/12/06		37,85	20,99	58,84
03/12/06		68,30	80,26	148,56
04/12/06		35,15	24,40	59,55
05/12/06		34,30	31,80	66,11
06/12/06	0,47	81,26	49,24	130,50
07/12/06		31,66	20,69	52,35
08/12/06		44,54	18,07	62,61
09/12/06		47,33	21,66	68,99
10/12/06		34,53	52,01	86,54
11/12/06	8,23	33,35	17,43	50,78
12/12/06	0,67	79,82	77,52	157,35
13/12/06	1,21	45,24	29,64	74,88
14/12/06	11,36	32,26	10,66	42,93
15/12/06	0,29	16,51	8,43	24,94
16/12/06	0,20	23,59	12,24	35,83
17/12/06		23,68	17,76	41,43
18/12/06	0,95	9,39	5,83	15,22
19/12/06	0,12	19,87	7,80	27,67
20/12/06	24,50	40,05	10,16	50,21
21/12/06		8,27	14,18	22,45

**Tabela A2 – Precipitação e carga de sedimentos – Segundo período de amostragem em duas zonas.**

Data	P (mm)	Carga de sedimentos (g/m <sup>2</sup> )		
		Livre total	Fixa Total	Total
06/02/07		22,08	22,22	34,77
07/02/07	1,32	9,70	9,54	11,96
08/02/07		34,14	17,55	43,82
09/02/07		33,87	6,79	35,98
10/02/07		32,99	8,69	38,04
11/02/07		21,32	10,40	25,57
12/02/07		83,75	25,57	103,39
13/02/07	0,47	45,75	11,28	50,60
14/02/07		48,84	24,79	66,92
15/02/07		34,77	12,48	40,39
16/02/07		51,73	12,31	57,55
17/02/07	23,77			
18/02/07				
19/02/07				
20/02/07	0,19			
21/02/07				
22/02/07	19,4			
23/02/07	73,95			
24/02/07	22,26			
25/02/07				
26/02/07				
27/02/07	24,5	7,71	5,36	10,91
28/02/07		17,62	6,58	20,40
01/03/07		14,61	8,19	16,92
02/03/07	42,96			
03/03/07	4,86			
04/03/07	0,78	9,14	8,49	15,46
05/03/07	0,36	27,20	3,28	29,06
06/03/07	30,38	22,49	4,41	24,90
07/03/07	0,28			
08/03/07		30,90	2,35	31,96
09/03/07	51,69			
10/03/07	0,59			
11/03/07		10,82	14,91	20,10
12/03/07		13,34	7,75	19,50
13/03/07		26,11	8,68	29,38
14/03/07		27,35	11,50	33,53
15/03/07		23,93	8,39	27,25
16/03/07		23,59	5,95	27,26
17/03/07	0,21	39,65	10,79	46,45
18/03/07		30,00	11,91	33,71
19/03/07	2,02			
20/03/07		35,03	13,71	39,78
21/03/07		34,49	12,39	43,73
22/03/07		39,27	18,06	49,83
23/03/07		65,14	15,83	69,84

**Tabela A3 – Precipitação e carga de sedimentos – Terceiro período de amostragem em três zonas.**

Data	P (mm)	Carga de sedimento (g/m <sup>2</sup> )		
		Carga Livre	Carga Fixa	Carga Total
28/04/07		15,63	9,17	24,80
29/04/07		39,96	12,38	52,33
30/04/07		43,75	24,29	68,04
01/05/07				
02/05/07	31,17			
03/05/07		11,76	4,38	16,13
04/05/07				
05/05/07		92,43	13,51	105,94
06/05/07	14,02	27,58	7,72	35,30
07/05/07	0,93			
08/05/07		31,39	13,09	44,48
09/05/07		65,02	10,41	75,43
10/05/07		33,08	8,38	41,46
11/05/07	0,21	30,38	19,97	50,35
12/05/07		63,75	14,25	78,00
13/05/07	13,24			
14/05/07		51,37	23,48	74,85
15/05/07		72,04	33,40	105,44
16/05/07	38,88			
17/05/07		13,94	13,80	27,74
18/05/07		70,33	11,18	81,51
19/05/07		66,94	26,47	93,41
20/05/07		87,17	30,91	118,08
21/05/07	2			
22/05/07	10,31	36,71	75,23	111,93
23/05/07	0,56	41,92	20,19	62,11
24/05/07		39,77	12,57	52,34
25/05/07		69,57	19,28	88,85
26/05/07		81,37	16,97	98,34
27/05/07		103,37	41,93	145,30
28/05/07		94,06	18,80	112,85
29/05/07		109,00	30,14	139,15
30/05/07		84,20	23,05	107,25
31/05/07		77,00	18,85	95,85
01/06/07		95,81	31,58	127,40
02/06/07		97,77	37,30	135,07
03/06/07		81,87	30,51	112,39
04/06/07		72,99	26,19	99,19
05/06/07		81,69	19,08	100,77
06/06/07		117,95	27,11	145,06

**Tabela A4 – Precipitação e carga de sedimentos – Quarto período de amostragem em três zonas.**

Data	P (mm)	Carga de sedimentos (g/m <sup>2</sup> )		
		Carga Livre	Carga Fixa	Carga Toata
03/07/07		39,86	12,84	52,70
04/07/07		80,88	10,79	91,68
05/07/07		40,41	11,82	52,23
06/07/07		31,86	22,05	53,91
07/07/07	19,45			
08/07/07	1,99	23,50	29,90	53,40
09/07/07	8,08			
10/07/07	5,46			
11/07/07		20,92	24,32	45,24
12/07/07	0,04	32,65	22,25	54,89
13/07/07	0,34	8,31	27,33	35,64
14/07/07		51,44	35,06	86,50
15/07/07		60,86	30,65	91,51
16/07/07		41,07	28,85	69,92
17/07/07	0,72	94,95	38,63	133,58
18/07/07	0,11	56,58	45,81	102,38
19/07/07		76,06	67,63	143,69
20/07/07		154,01	120,85	274,86
21/07/07	16,28	118,27	65,09	183,36
22/07/07	23,6			
23/07/07		77,82	72,08	149,90
24/07/07		47,47	22,03	69,51
25/07/07		26,54	11,52	38,06
26/07/07		32,71	13,88	46,59
27/07/07		50,39	10,36	60,75
28/07/07		70,14	14,18	84,32
29/07/07		52,94	19,09	72,03
30/07/07		310,05	21,73	331,79
31/07/07		59,03	21,99	81,02
01/08/07		68,41	21,37	89,78
02/08/07	19,71			
03/08/07	11,04			
04/08/07	14,5			
05/08/07		56,64	45,27	101,91
06/08/07	4,88	35,78	24,26	60,05
07/08/07		60,93	13,45	74,38
08/08/07		102,91	34,63	137,54

**Tabela A5 – Precipitação e carga de sedimentos – Quinto período de amostragem em três zonas.**

Data	P (mm)	Carga de sedimentos (g/m <sup>2</sup> )		
		Carga Livre	Carga Fixa	Carga Total
23/08/07		38,32	10,42	48,73
24/08/07	9,38	50,98	22,35	73,32
25/08/07	13,01	22,64	20,33	42,96
26/08/07	0,96	13,36	8,62	21,98
27/08/07	0,35	90,72	30,70	121,42
28/08/07		62,56	11,47	74,03
29/08/07		64,93	17,01	81,94
30/08/07		53,07	12,78	65,85
31/08/07	10,01	15,60	20,21	35,81
01/09/07	1,02	46,48	9,00	55,48
02/09/07		83,68	22,38	106,06
03/09/07		43,99	13,31	57,29
04/09/07		96,77	16,55	113,32
05/09/07		74,62	17,26	91,87
06/09/07	0,55	71,18	23,58	94,76
07/09/07		94,41	29,30	123,71
08/09/07		90,72	33,35	124,06
09/09/07		107,45	36,80	144,25
10/09/07		151,15	22,35	173,50
11/09/07		72,33	19,34	91,67
12/09/07		238,99	23,16	262,15
13/09/07		134,05	90,29	224,34
14/09/07	3,09	191,89	19,64	211,53
15/09/07	2,1	59,08	35,93	95,01
16/09/07		127,38	48,02	175,41
17/09/07	2,85	100,71	37,30	138,01
18/09/07	36,12	28,24	27,81	56,05
19/09/07	0,78			
20/09/07	14,72			
21/09/07	5,07			
22/09/07	62,59			
23/09/07	71,68			
24/09/07		10,45	5,29	15,74
25/09/07		13,60	8,05	21,65
26/09/07	3,19			
27/09/07		13,72	9,55	23,27
28/09/07		12,82	4,95	17,77
29/09/07		41,27	12,84	54,11
30/09/07		64,12	12,68	76,80
01/10/07		69,50	12,33	81,83
02/10/07		42,34	10,74	53,07
03/10/07		48,82	9,86	58,68
04/10/07	1,49	71,44	8,69	80,13
05/10/07	1,32	23,90	5,79	29,69
06/10/07	1,43	36,22	14,27	50,49
07/10/07		26,28	15,67	41,94
08/10/07	0,03	61,13	14,12	75,25
09/10/07		41,92	9,95	51,86

**Tabela A6 – Precipitação e carga de sedimentos – Terceiro período de amostragem Lado Direito e Lado Esquerdo.**

Data	P (mm)	Carga de sedimentos (g/m <sup>2</sup> )	
		Lado Direito	Lado Esquerdo
16/05/07	38,88		
17/05/07		23,94	15,68
18/05/07		12,39	5,05
19/05/07		13,06	8,46
20/05/07		6,16	9,53
21/05/07	2		
22/05/07	10,31	16,75	19,46
23/05/07	0,56	77,89	50,46
24/05/07		18,58	6,74
25/05/07		24,63	18,04
26/05/07		12,04	14,72
27/05/07		11,97	5,11
28/05/07		16,26	10,84
29/05/07		17,67	20,27
30/05/07		21,83	11,08
31/05/07		16,85	7,95
01/06/07		42,10	13,83
02/06/07		36,99	19,31
03/06/07		14,55	22,50
04/06/07		5,73	7,76
05/06/07		31,20	25,04
06/06/07		11,33	9,67

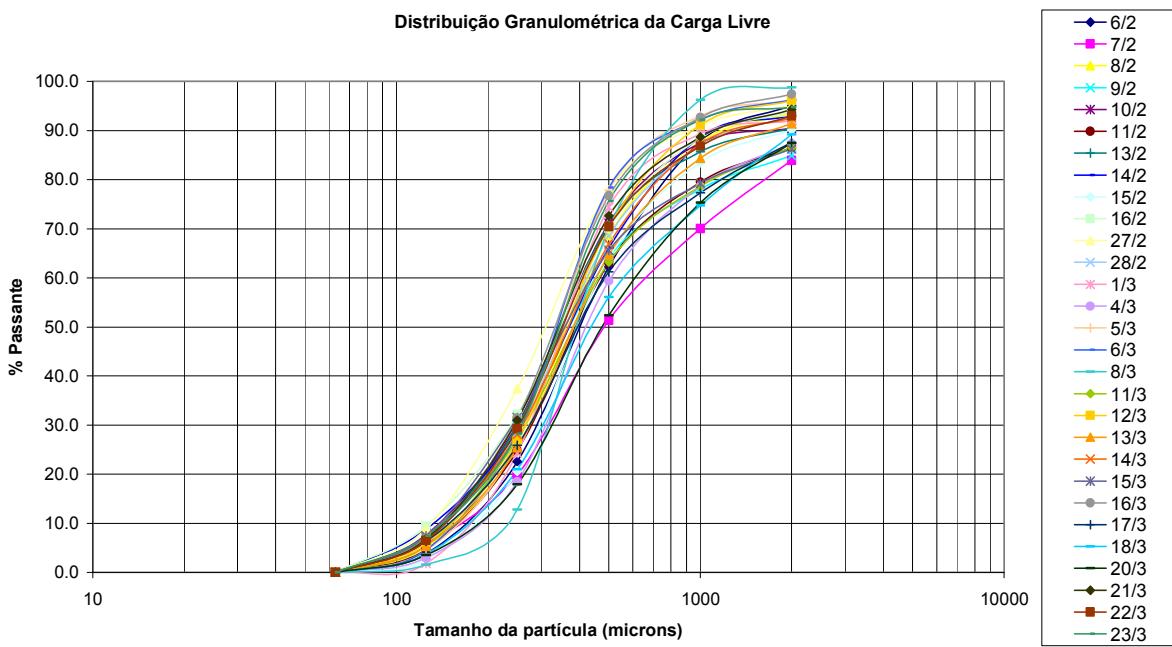
**Tabela A7 – Precipitação e carga de sedimentos – Quarto período de amostragem Lado Direito e Lado Esquerdo.**

<b>Data</b>	<b>P (mm)</b>	<b>Carga de sedimentos (g/m<sup>2</sup>)</b>	
		<b>Lado Direito</b>	<b>Lado Esquerdo</b>
03/07/07		54,64	28,23
04/07/07		27,33	16,10
05/07/07		24,29	10,77
06/07/07		14,93	10,94
07/07/07	19,45		
08/07/07	1,99	8,48	27,83
09/07/07	8,08		
10/07/07	5,46		
11/07/07		19,58	14,26
12/07/07	0,04	30,69	13,68
13/07/07	0,34	10,74	5,86
14/07/07		17,48	8,61
15/07/07		103,72	11,71
16/07/07		12,22	13,00
17/07/07	0,72	48,19	23,81
18/07/07	0,11	53,61	23,95
19/07/07		53,44	15,22
20/07/07		32,56	21,18
21/07/07	16,28	21,51	8,17
22/07/07	23,6		
23/07/07		26,57	21,66
24/07/07		12,17	15,39
25/07/07		8,59	46,45
26/07/07		8,72	19,44
27/07/07		7,05	8,72
28/07/07		9,23	12,01
29/07/07		8,30	17,01
30/07/07		10,81	10,15
31/07/07		7,06	9,55
01/08/07		7,76	5,87
02/08/07	19,71		
03/08/07	11,04		
04/08/07	14,5		
05/08/07		56,03	85,34
06/08/07	4,88	23,59	12,83
07/08/07		123,51	26,93
08/08/07		13,87	15,40

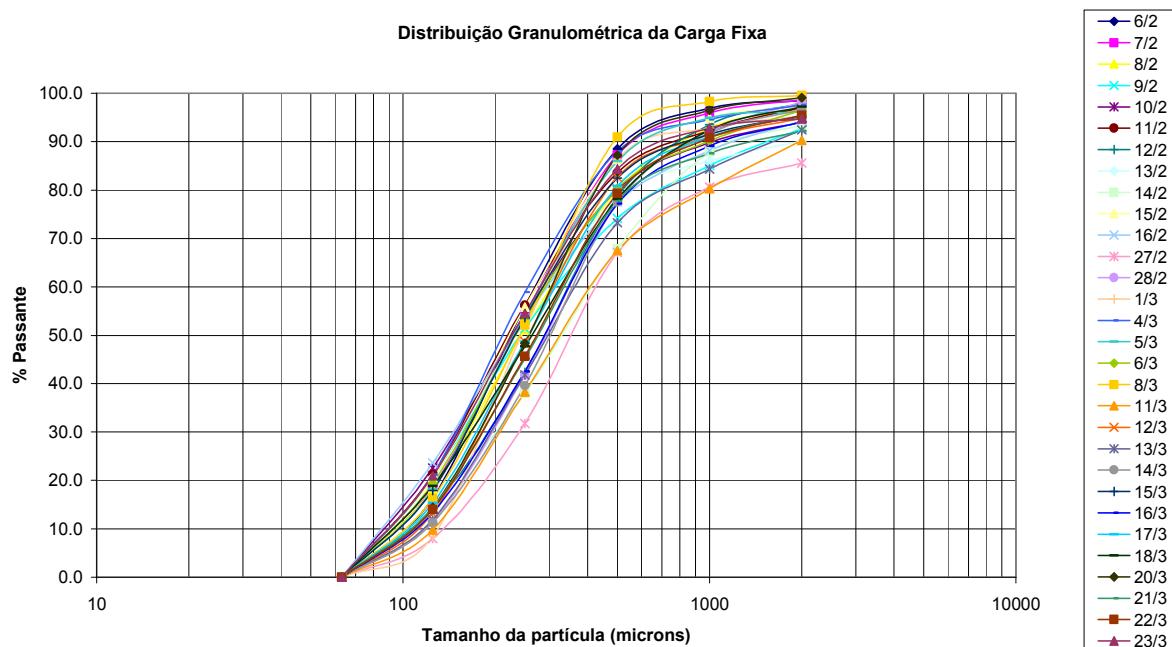
**Tabela A8 – Precipitação e carga de sedimentos – Quinto período de amostragem Lado Direito e Lado Esquerdo.**

<b>Data</b>	<b>P (mm)</b>	<b>Carga de sedimentos (g/m<sup>2</sup>)</b>	
		<b>Lado Direito</b>	<b>Lado Esquerdo</b>
23/08/07		41,00	40,26
24/08/07	9,38	21,42	15,97
25/08/07	13,01	11,32	16,71
26/08/07	0,96	6,46	5,07
27/08/07	0,35	10,79	8,67
28/08/07		7,71	9,92
29/08/07		7,99	8,58
30/08/07		9,07	8,34
31/08/07	10,01	16,34	71,25
01/09/07	1,02	13,23	20,91
02/09/07		31,86	24,97
03/09/07		20,95	5,61
04/09/07		29,00	9,89
05/09/07		31,32	10,83
06/09/07	0,55	11,12	11,81
07/09/07		18,74	7,64
08/09/07		8,33	22,00
09/09/07		5,64	5,78
10/09/07		11,62	12,77
11/09/07		10,64	11,71
12/09/07		11,07	47,29
13/09/07		9,40	21,01
14/09/07	3,09	21,28	48,51
15/09/07	2,10	56,27	53,85
16/09/07			71,96
17/09/07	2,85	22,14	23,61
18/09/07	36,12	141,98	55,01
19/09/07	0,78		
20/09/07	14,72		
21/09/07	5,07		
22/09/07	62,59		
23/09/07	71,68		
24/09/07		5,73	7,47
25/09/07		5,76	2,36
26/09/07	3,19		
27/09/07			19,64
28/09/07		13,33	7,59
29/09/07		11,48	9,56
30/09/07		9,49	7,54
01/10/07		9,96	10,72
02/10/07		10,13	8,73
03/10/07		12,77	11,91
04/10/07	1,49	57,16	21,59
05/10/07	1,32		8,26
06/10/07	1,43	35,72	45,56
07/10/07		41,52	25,61
08/10/07	0,03	19,22	11,40
09/10/07		13,50	10,43

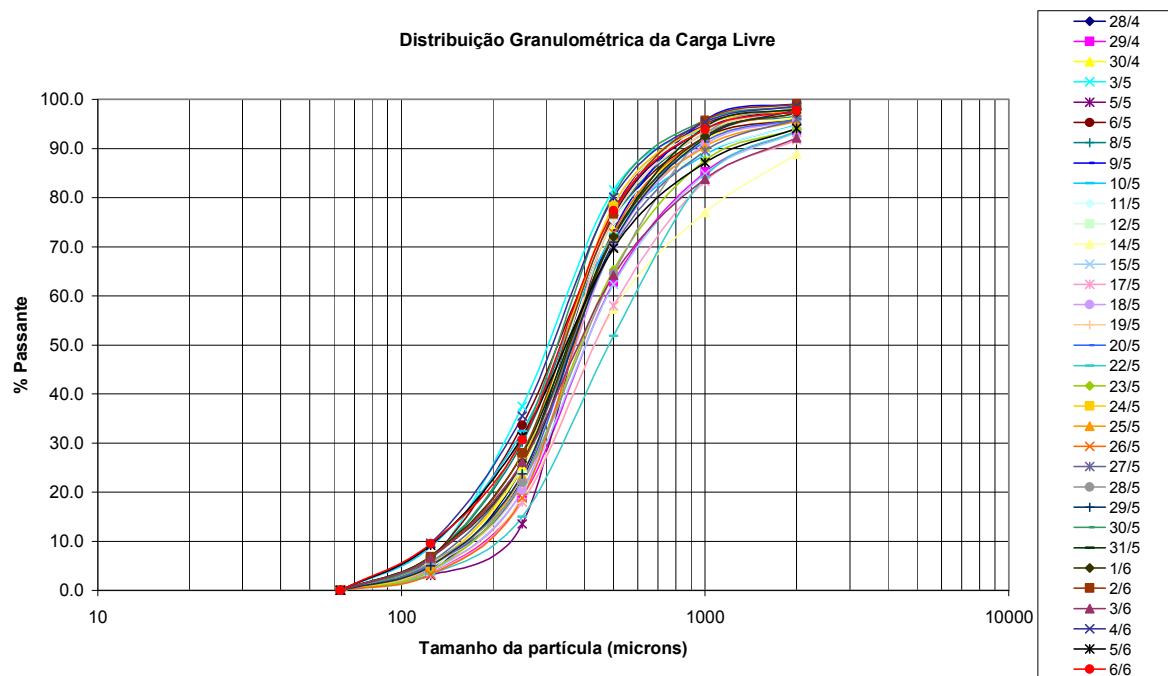
**APÊNDICE B – CURVAS GRANULOMÉTRICAS DAS AMOSTRAS DE  
SEDIMENTO SECO**



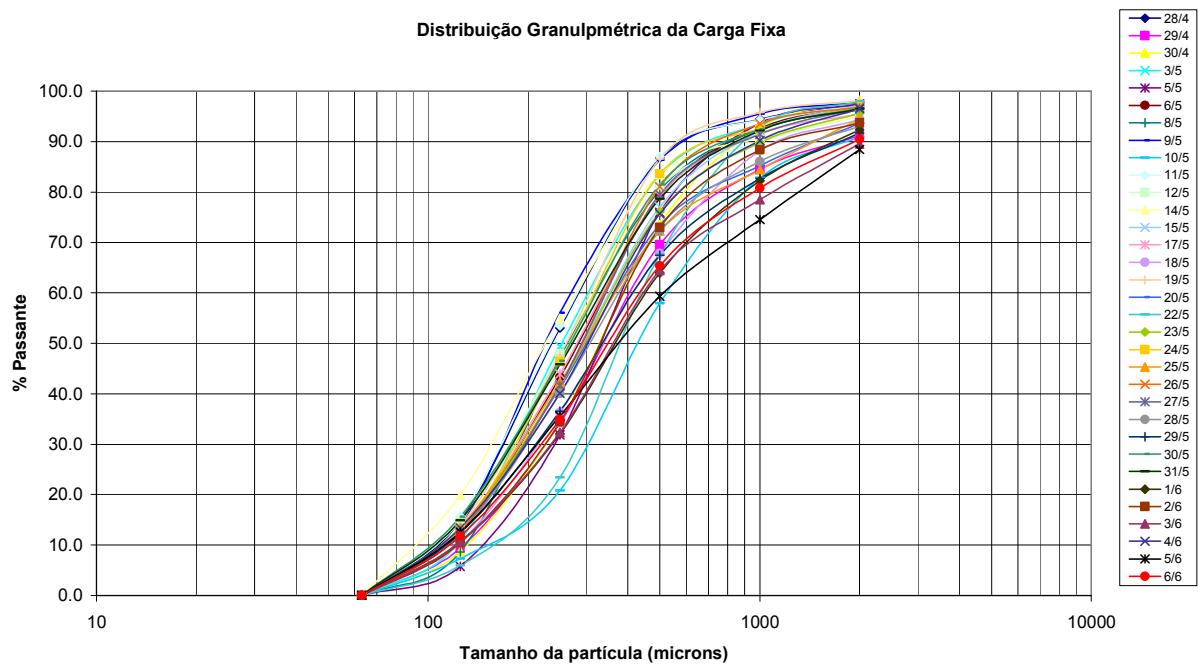
**Figura B1 – Distribuição granulométrica da carga livre referente ao segundo período de amostragem.**



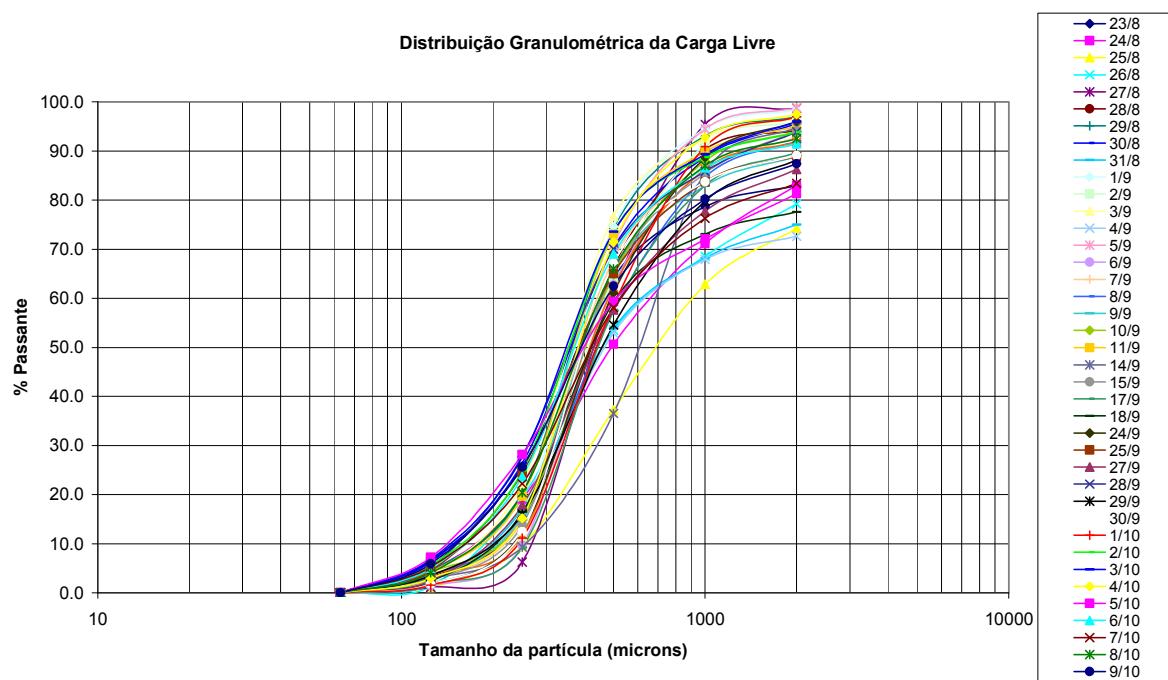
**Figura B2 – Distribuição granulométrica da carga fixa referente ao segundo período de amostragem.**



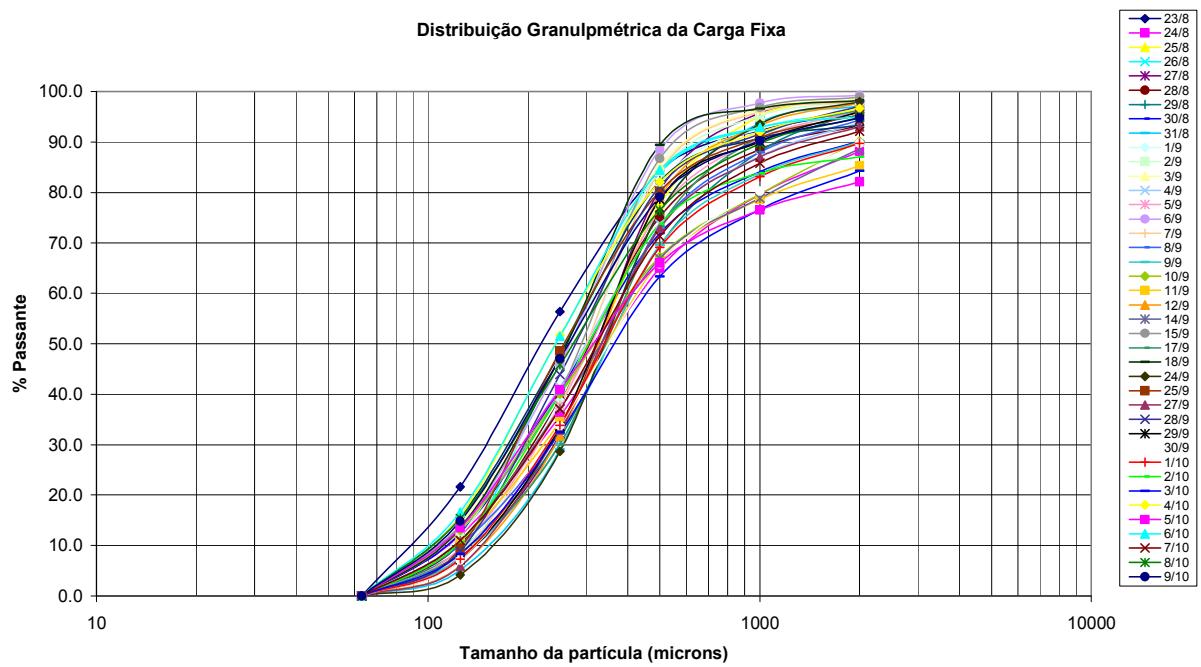
**Figura B3 – Distribuição granulométrica da carga livre referente ao terceiro período de amostragem.**



**Figura B4 – Distribuição granulométrica da carga fixa referente ao terceiro período de amostragem.**



**Figura B5 – Distribuição granulométrica da carga livre referente ao quinto período de amostragem.**

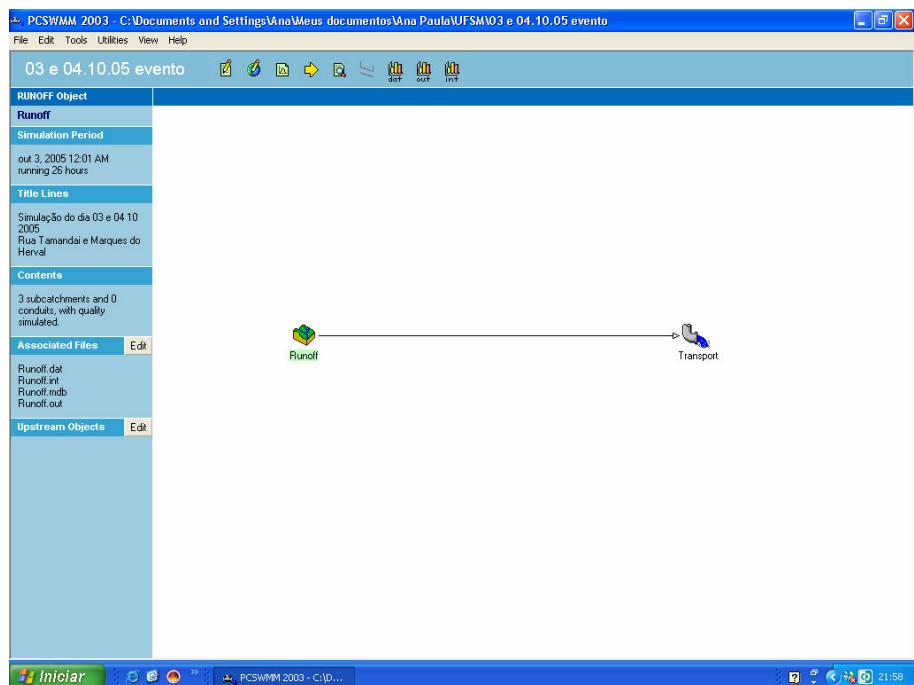


**Figura B6 – Distribuição granulométrica da carga fixa referente ao quinto período de amostragem.**

## **ANEXOS**

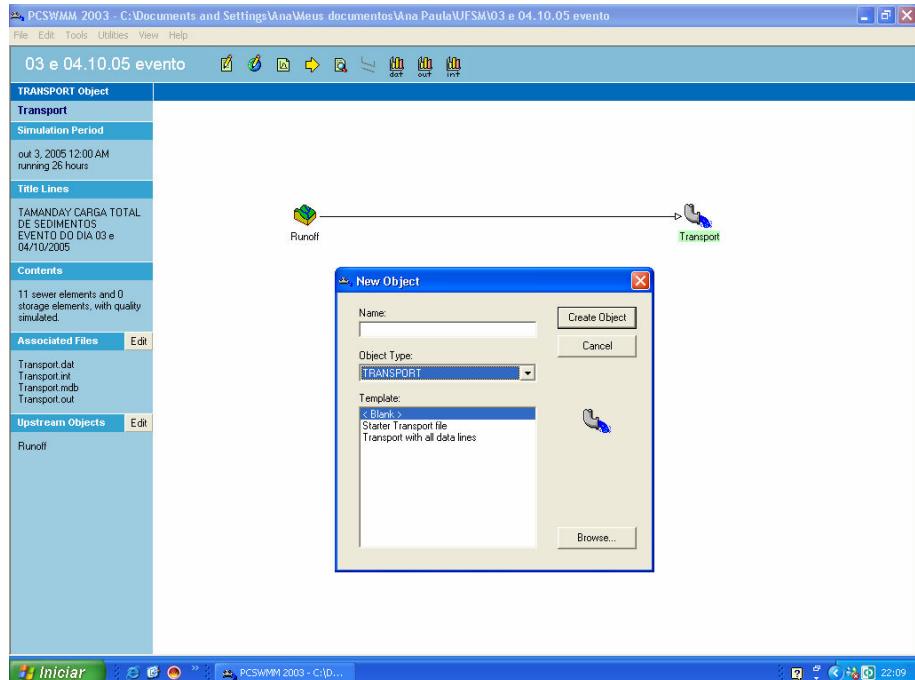
**ANEXO C – JANELAS DE APRESENTAÇÃO DO APLICATIVO PCSWMM 2003**

Este anexo tem o objetivo de mostrar a interação do usuário com o aplicativo. O PCSWMM 2003 foi desenvolvido em ambiente Windows para facilitar a entrada de dados, pois a versão original do SWMM foi desenvolvida em linguagem Fortran, em ambiente DOS e necessitava extensos arquivos de entrada com configurações complexas. A seguir são mostradas algumas telas desta versão. A figura C1 mostra a apresentação dos módulos Runoff e Transport.



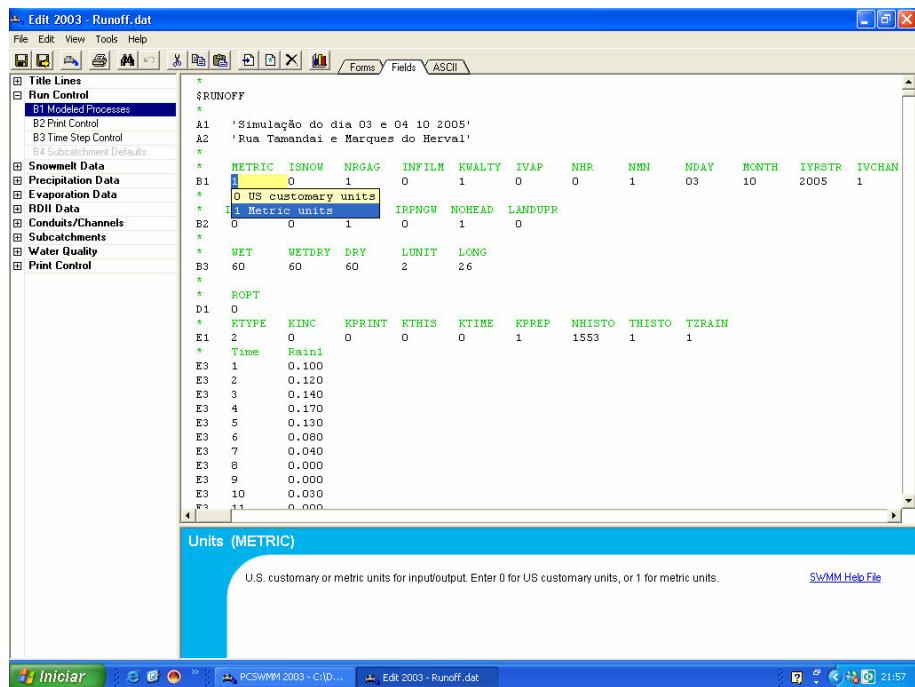
**Figura C1 – apresentação dos módulos Runoff e Transport.**

A figura C2 apresenta a adição de novos módulos.



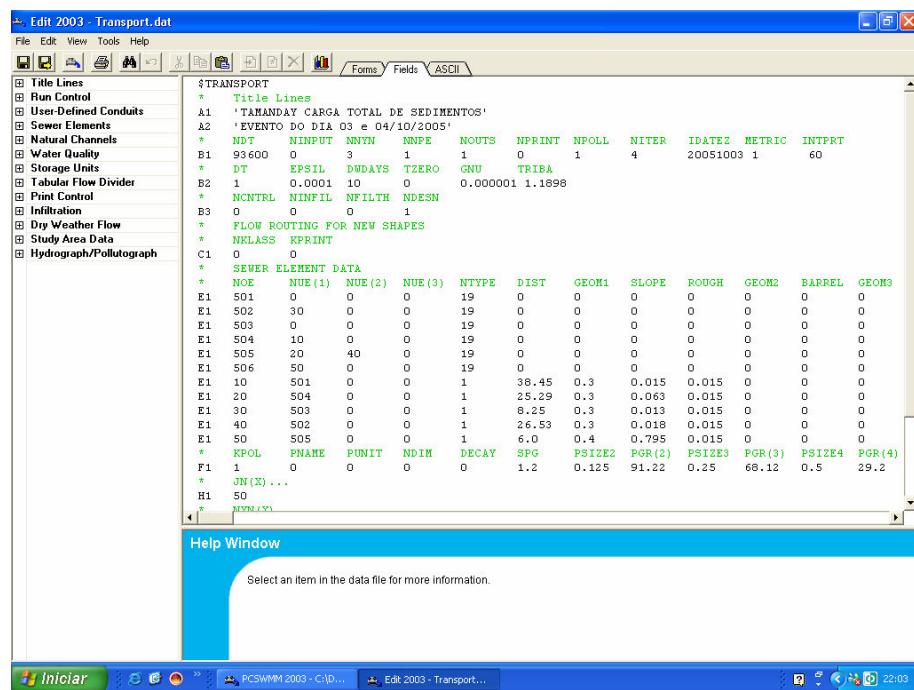
**Figura C2 – Caixa para adição de novos módulos.**

A figura C3 apresenta a janela para os dados de entrada no módulo Runoff.



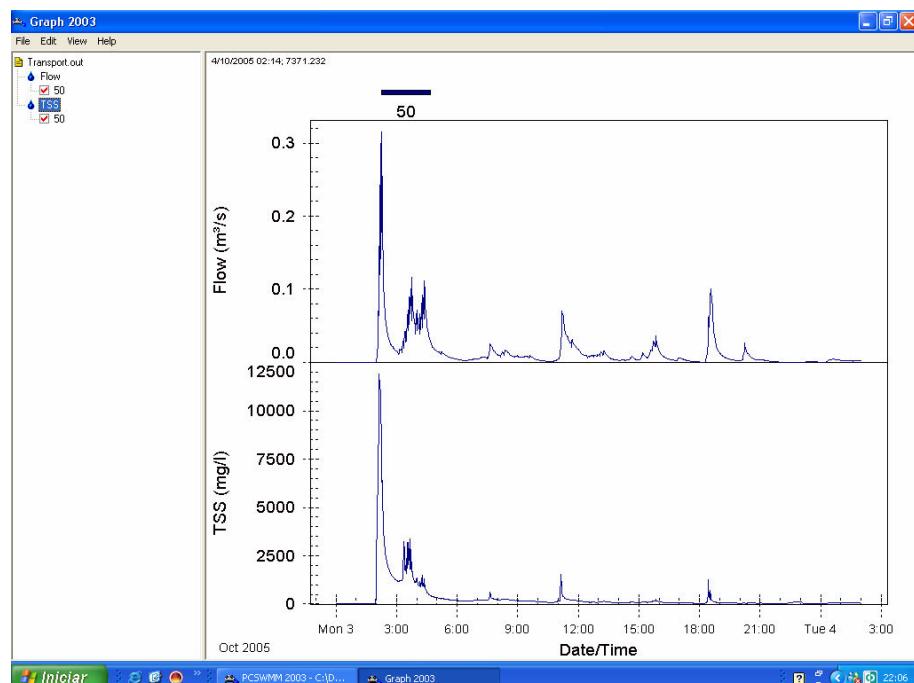
**Figura C3 – Caixa de entrada de dados no módulo Runoff.**

A figura C4 apresenta a janela para os dados de entrada no módulo Transport.



**Figura C4 – Caixa de entrada de dados no módulo Transport.**

A figura C5 apresenta a janela para os gráficos de saída no módulo Transport



**Figura C5 – Gráficos de saída do módulo Transport.**

**ANEXO D – EQUACIONAMENTOS E PROCEDIMENTOS UTILIZADOS PELOS  
MÓDULOS RUNOFF E TRANSPORT**

Este anexo tem a finalidade de apresentar o equacionamento e o procedimento de cálculo utilizados, pelos módulo Runoff e Transport, do modelo SWMM.

#### - Módulo Runoff

Segundo Garcia (2005 apud Bastos, 2007), o módulo Runoff processa suas rotinas com base em dados de precipitação ou neve, simulando degelo, infiltração em áreas permeáveis (modelos de Horton ou Green Ampt), detenção na superfície, escoamento na superfície e em canais, podendo ser utilizado para simulação de eventos isolados ou contínuos. Na análise das sub-bacias, elas são subdivididas em três sub-áreas, como mostrado na figura D1 e na tabela D1. Assim temos que a sub-área A1 é impermeável com armazenamento nas depressões (detenção), a sub-área A2 é permeável com armazenamento nas depressões do solo e a sub-área A3 é impermeável se armazenamento nas depressões.

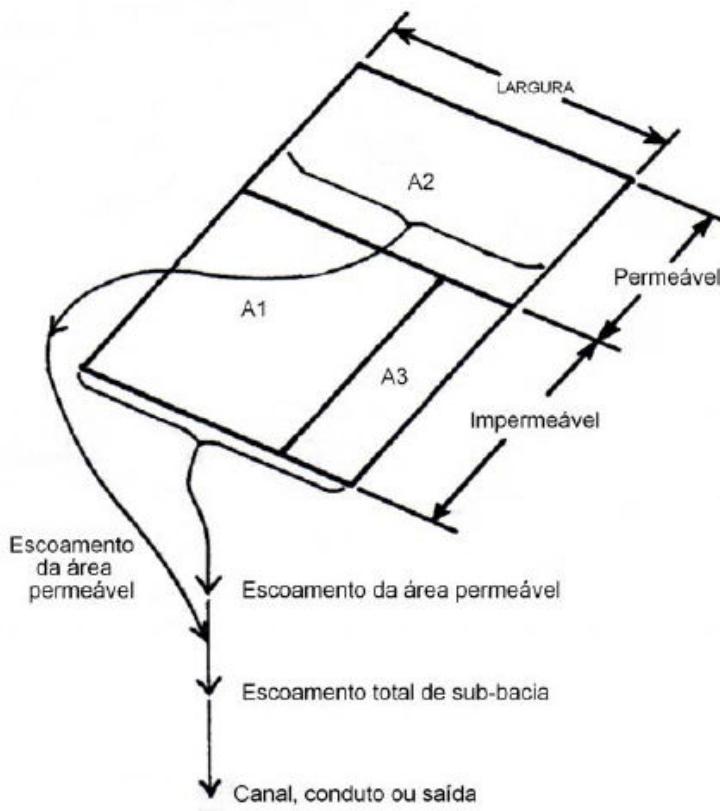
O valor das áreas impermeáveis sem armazenamento, nas depressões do solo, é especificado para cada sub-bacia, pelo parâmetro PCTZER (como uma porcentagem):

$$A3 = \frac{PCTZER}{100} (A1 + A3) \quad (D.1)$$

onde:

PCTZER = Porcentagem das áreas impermeáveis sem armazenamento.

Em nenhuma sub-bacia pode ser atribuído zero para este parâmetro, sendo utilizado no estudo 25% de áreas impermeáveis com zero armazenamento, valor padrão do modelo.



**Figura D1 - Esquematização das sub-bacias (Fonte: Garcia, 2005 apud Bastos, 2007).**

**Tabela D1 – Classificação superficial da sub-bacia (Huber e Dickinson et al. 1992).**

Sub-área	Impermeabilidade	Armazenamento por detenção
A1	Impermeável	Sim
A2	Permeável	Sim
A3	Impermeável	Não

O escoamento superficial é obtido através de um reservatório não-linear para cada sub-áreas, como mostra o esquema na figura D.1, e representado pela combinação das equações de Manning d da continuidade, que podem ser escritas da seguinte forma:

$$\frac{dV}{dt} = A \frac{dd}{dt} = Ai^* - Q \quad (\text{D.2})$$

onde:

$V = A \cdot d$  = volume de água sobre a sub-área ( $\text{m}^3$ );

$A$  = área sub-área da sub-bacia ( $\text{m}^2$ );

$i^*$  = precipitação efetiva;

$d$  = profundidade da água no reservatório;  
 $t$  = tempo.

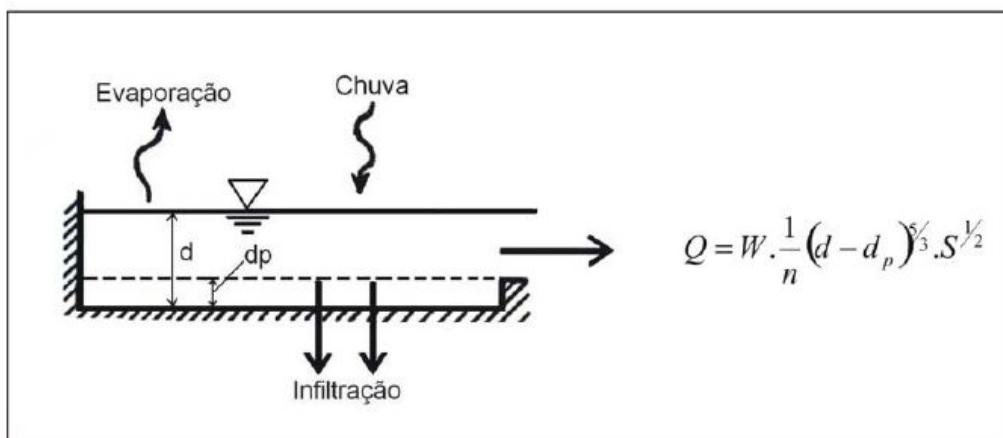
A vazão é gerada usando a equação de Manning

$$Q = W \cdot \frac{1}{n} (d - d_p)^{5/3} \cdot S^{1/2} \quad (\text{D.3})$$

onde:

$W$  = largura da sub-bacia (m);  
 $n$  = coeficiente de rugosidade de Manning;  
 $d_p$  = profundidade do armazenamento (m);  
 $S$  = declividade da sub-bacia (m/m).

A figura D2 representa o reservatório não linear para as sub-bacias



**Figura D2 – Representação do reservatório não linear das sub-bacias (Fonte: Garcia, 2005 apud Bastos, 2007)**

Essas duas equações (D.2 e D.3) podem ser combinadas em uma equação diferencial não linear, que pode ser resolvida para valores de  $d$  desconhecidos. Produzindo a equação D.4 do reservatório não linear:

$$\frac{dd}{dt} = i^* - \frac{W}{A \cdot n} (d - d_p)^{5/3} S^{1/2} = i^* + WCOM \cdot (d - d_p)^{5/3} \quad (\text{D.4})$$

onde:

$$WCOM = \frac{W.S^{\frac{1}{2}}}{A.n} \quad (D.5)$$

A equação dd/dt é resolvida em cada passo de tempo através do método de diferenças finitas.

A chuva efetiva é dada pelo programa como uma média no passo de tempo. A média dos fluxos de saída é calculada usando a média entre as alturas de armazenamento. Sendo estas representadas como 1 e 2 para o início e o final do passo de tempo, respectivamente, a equação pode ser escrita como:

$$\frac{d_2 - d_1}{\Delta t} = i^* + WCON \left[ d_1 + \frac{1}{2}(d_2 - d_1) - d_p \right]^{\frac{5}{3}} \quad (D.6)$$

onde:

$\Delta t$  = intervalo de tempo (s).

Esta equação é resolvida para  $d_2$ , através do processo iterativo de Newton-Raphson. Baptista et al. (2003) apresenta em um apêndice a solução de equações não lineares pelo Método de Newton-Raphson.

Para a infiltração em áreas permeáveis o modelo SWMM dispõe de duas opções para sua estimativa: o modelo de Horton ou Green Ampt. No estudo foi utilizado o modelo de Horton na determinação da infiltração.

A equação de Horton calcula a capacidade de infiltração no solo como uma função no tempo:

$$I = I_b + (I_0 - I_b)e^{-kt} \quad (D.7)$$

onde:

I = capacidade de infiltração no solo, mm/h;

$I_b$  = taxa mínima de infiltração, mm/h;

$I_0$  = taxa de infiltração máxima ou inicial, mm/h;

t = tempo decorrido desde a saturação superficial do solo, segundos;

k = coeficiente de decaimento,  $s^{-1}$ .

Para a geração de componentes de qualidade o módulo Runoff permite ser simulado no máximo dez tipos de componentes de qualidade diferentes. O modo de acumulação dos poluentes pode ser considerado até quatro tipos de funções de acumulação sendo elas:

#### 1 e 2 – Linear-Potência

$$PSHED = QFACT(3).t^{QFACT(2)} \quad (D.8)$$

$$PSHED \leq QFACT(1) \quad (D.9)$$

onde:

$QFACT(1)$  = máxima quantidade de sólidos esperados na superfície, ( $\text{Kg}/\text{Km}^2$ );

$QFACT(2)$  = expoente = 1 para o caso linear;

$QFACT(3)$  = máxima quantidade de sólidos esperados na superfície, ( $\text{Kg}/\text{Km}^2$ ).( $\text{dia}^{-QFACT(2)}$ );

$t$  = tempo, dia.

#### 3 – Exponencial

$$PSHED = QFACT(1).(1 - e^{-QFACT(2).t}) \quad (D.10)$$

onde:

$QFACT(1)$  = máxima quantidade de sólidos esperados na superfície, ( $\text{Kg}/\text{Km}^2$ );

$QFACT(2)$  = constante de acumulação, ( $\text{dia}^{-1}$ );

$t$  = tempo, dia.

#### 4 – Michaelis-Menton

$$PSHED = QFACT(1).t / (QFACT(3) + t) \quad (D.11)$$

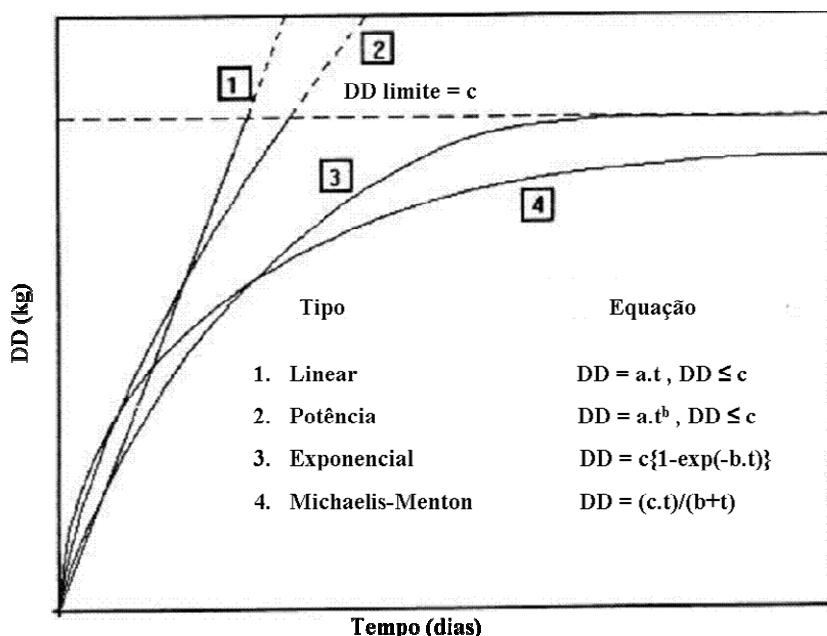
onde:

$QFACT(1)$  = máxima quantidade de sólidos esperados na superfície, ( $\text{Kg}/\text{Km}^2$ );

$QFACT(3)$  = tempo necessário para atingir a formação máxima, dia;

$t$  = tempo, dia.

A figura D3 apresenta o comportamento de cada função.



**Figure D3 - Equações de formação utilizada em SWMM (fonte: modificado de Huber et.al., 1988).**

As concentrações de poluentes são calculadas dividindo a quantidade de poluentes carreadas, (mg/s), pela vazão, ( $m^3/s$ ), para se ter a quantidade de poluentes em função do volume, (mg/L).

$$C = \frac{1}{Q} \left( \frac{dPSHED}{dt} \right) = const. \frac{RCOEF \cdot r \cdot PSHED}{A \cdot r} \quad (D.12)$$

onde:

C = concentração, mg/L,

Q = A.r = vazão,  $m^3/s$ ,

A = área, ha,

r = intensidade de chuva, mm/h,

RCOEF = coeficiente de carreamento, e

PSHED = quantidade de poluentes disponível para o carreamento.

A quantidade de poluentes carreadas é calculada a cada passo de tempo, POFF, proporcional a intensidade da chuva e a um expoente, WASHPO;

$$-POFF(t) = \frac{dPSHED}{dt} = -RCOEFX.r^{WASHPO}.PSHED \quad (D.13)$$

onde:

POFF = quantidade de poluente carreadas no tempo, t, (mg/s),

PSHED = quantidade de poluente disponível para o carreamento no tempo, t, (mg),

RCOEFX = coeficiente de carreamento = RCOEF/3600, (mm/h)<sup>-WASHPO</sup>.sec<sup>-1</sup>,

e

r = intensidade de chuva, mm/h.

A quantidade poluente disponível para o carreamento é calculado a cada passo de tempo pela formula:

$$PSHED(t + \Delta t) = PSHED(t).e^{-RCOEF \cdot \frac{r(t)^{WASHPO} + r(t + \Delta t)^{WASHPO}}{2} \cdot \Delta t} \quad (D.14)$$

onde:

PSHED(t) = quantidade de poluente disponível em relação a função de acumulação, mg,

RCOEF = coeficiente de carreamento,

r = intensidade de chuva, mm/h,

$\Delta t$  = intervalo de tempo,

WASHPO = expoente.

Substituindo na equação ?

$$C(t + \Delta t) = (Const.RCOEFX) / A.r(t + \Delta t)^{WASHPO-1}.PSHED(t + \Delta t) \quad (D.15)$$

- Módulo Transport

O módulo Transport propaga o escoamento na rede de drenagem segundo o conceito da onda cinemática, na qual são permitidas perturbações dentro dos condutos somente a

jusante. As equações que descrevem o modelo de onda cinemática são a equação da continuidade e a equação da conservação da quantidade de movimento:

- Equação da continuidade

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (\text{D.16})$$

onde:

$A$  = área da seção transversal;

$Q$  = vazão no conduto;

$x$  = distância ao longo do conduto;

$t$  = tempo.

- Equação da conservação da quantidade de movimento

$$S_0 = S_f \quad (\text{D.17})$$

onde:

$S_0$  = declividade do perfil longitudinal;

$S_f$  = declividade da linha de energia.

A declividade da linha de energia é calculada pela fórmula de Manning:

$$S_f = Q^2 / \left[ (\beta/n)^2 \cdot A^2 \cdot R^{4/3} \right] \quad (\text{D.18})$$

onde:

$n$  = coeficiente de rugosidade de Manning,

$R$  = raio hidráulico, m,

$\beta = 1$ .

Substituindo na equação 20:

$$Q = (k/n) \cdot A \cdot R^{2/3} \cdot S_0^{1/2} \quad (\text{D.19})$$

No módulo TRANSPORT só são propagados efeitos hidráulicos a jusante, não são simulados condições de remanso, ou seja, considera o sistema de drenagem como uma cascata de canais a jusante. Além disso, o fluxo é calculado em função da profundidade não sendo simulados fluxos sobre pressões. Os fluxos que excedem a capacidade dos canais são armazenados ao nós a jusante do canal e liberados quando a capacidade for disponível novamente, podendo mascarar os resultados finais.

Substituindo na equação (1) e expressando em diferenças finitas tem-se:

$$\begin{aligned} & [(1-w_t)(A_{j,n+1} - A_{j,n}) + w_t(A_{j+1,n+1} - A_{j+1,n})]/\Delta t + \\ & [(1-w_x)(Q_{j+1,n} - Q_{j,n}) + w_x(Q_{j+1,n+1} - Q_{j,n+1})]/\Delta x = 0 \end{aligned} \quad (\text{D.20})$$

Onde:

$\Delta t = t_{n+1} - t_n$ , passo de tempo, segundos,

$\Delta x = x_{j+1} - x_j$ , intervalo de comprimento do canal, metros,

Na figura D3 é demonstrado a representação da equação D.20.

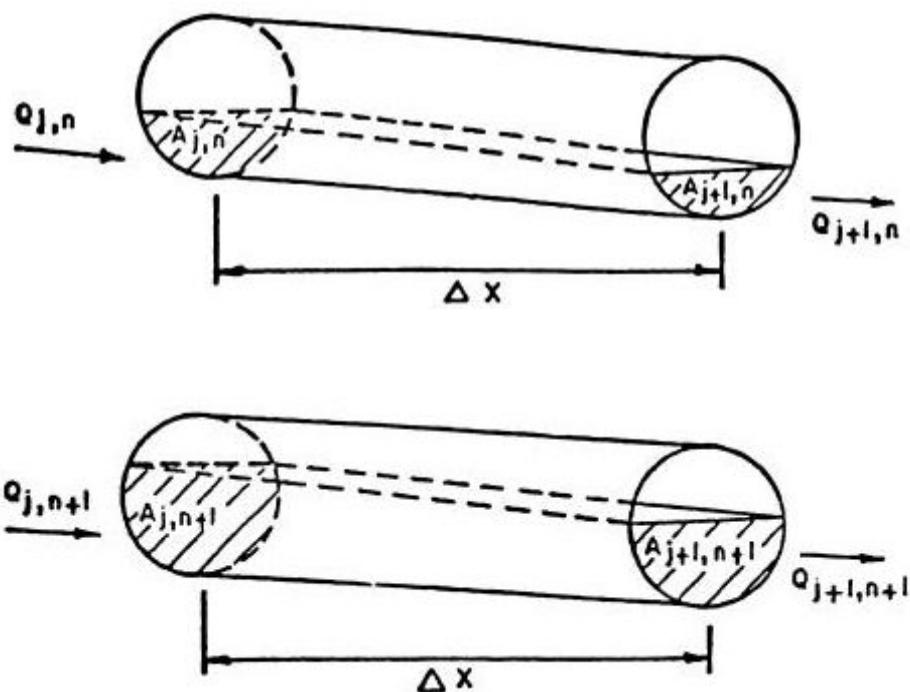


Figura D4 – Ilustração da forma de calcula da equação D20. Fonte: James, 2003.

Para o calculo da propagação dos poluentes pelo sistema de drenagem, o módulo é governado pela equação:

$$\frac{dVC}{dt} = V \frac{dC}{dt} + C \frac{dV}{dt} = Q_i C_i - QC - KVC + L \quad (\text{D.21})$$

Onde:

$C$  = concentração de poluente, massa por volume,

$V$  = volume,  $\text{m}^3$ ,

$Q_i$  = vazão a montante,  $\text{m}^3/\text{s}$ ,

$C_i$  = concentração a montante,  $\text{mg/L}$ ,

$Q$  = vazão a jusante,  $\text{m}^3/\text{s}$ ,

$K$  = coeficiente de decaimento,  $\text{s}^{-1}$ , e

$L$  = fonte de poluente, quantidade/tempo.

Para evitar instabilidade preciso obedecer certas condições, como:

$$\Delta t \geq \frac{2V}{Q} \quad (\text{D.22})$$

onde:

$\Delta t$  = intervalo de tempo, s;

$V$  = volume médio no conduto,  $\text{m}^3$ ;

$Q$  = vazão média no conduto,  $\text{m}^3/\text{s}$ .

A equação 50 integrada em função do intervalo de tempo resulta:

$$C(0) = C(t) \quad (\text{D.23})$$

$$C(t + \Delta t) = \left( \frac{Q_i C_i + L/V}{DENOM} \right) (1 - e^{-DENOM \cdot \Delta t}) + C(t) e^{-DENOM \cdot \Delta t} \quad (\text{D.24})$$

Onde:

$$DENOM = \frac{Q}{V} + K + \frac{1}{V} \left( \frac{dV}{dt} \right) \quad (\text{D.25})$$

O processo de transporte e deposição dos poluentes é calculado em relação ao diagrama de Shields. O diagrama de Shields define o início do movimento das partículas através do cálculo do diâmetro crítico, ou seja, através do diâmetro crítico é determinado se a partícula está ou não em movimento. Se o diâmetro crítico calculado for maior que o diâmetro da partícula, haverá um transporte de massa, caso contrário haverá uma deposição. A figura a seguir apresenta o diagrama de Shields:

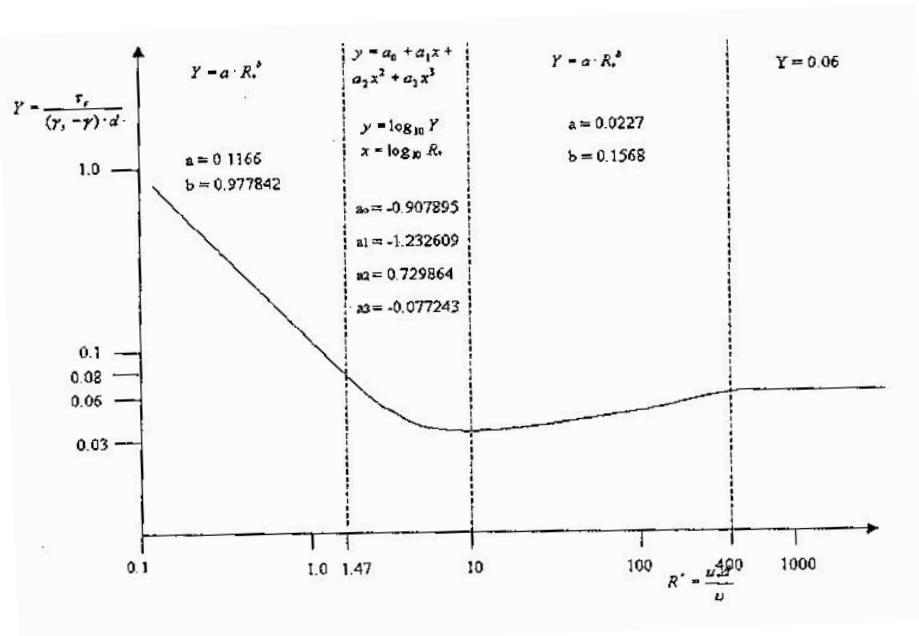


Figura D5 – Diagrama de Shilds. Fonte: James, 2003.

Para a região onde o número de Reynolds é igual a 1,47, o diâmetro crítico é calculado pela seguinte equação:

$$d = \frac{1,47 \cdot v}{\sqrt{R.S.g}} \quad (\text{D.26})$$

Para a região onde o número de Reynolds se encontra entre 1,47 a 10, o polinômio é resolvido através do processo iterativo de Newton-Raphson. Para a região entre 10 e 400 do número de Reynolds, o diâmetro crítico é resolvido pela seguinte equação:

$$CRITD = \left[ \frac{(R.S)^{1-b/2} v^b}{(SPG-1).a.g^{b/2}} \right]^{\frac{1}{1+b}} \quad (D.27)$$

Onde:

R = raio hidráulico, (m),

S = declividade, (m/m),

v = viscosidade cinemática, ( $10^{-6}$  m<sup>2</sup>/s),

a = 0,0227,

b = 0,1568,

SPG = gravidade específica do sedimento, ( $\gamma_s - \gamma$ ) =  $\gamma$ (SPG 1),

$\gamma$  = peso específico da água = 1000Kg/m<sup>3</sup>, e

$\gamma_s$  = peso específico do sedimento, Kg/m<sup>3</sup>.

Para a região onde o número de Reynolds é maior que 400, o diâmetro crítico é calculado pela equação:

$$d = \frac{R.S}{(SPG-1).0,06} \quad (D.28)$$

É necessário informar a distribuição granulométrica do poluente simulado para que o processo de deposição e carreamento sejam realizados pelo módulo. O módulo recalcula a distribuição granulométrica a cada passa de tempo em função do diâmetro crítico do poluente. Quando o material depositado é incorporado ao material em suspensão, um valor novo de DS (diâmetro sujeito a deposição) é calculado pela formula:

$$DS_2 = \frac{DS_1.M_s + CRITD.M_e}{M_s + M_e} \quad (D.29)$$

Onde:

DS<sub>2</sub> = novo valor do diâmetro DS, mm,

DS<sub>1</sub> = antigo valor do diâmetro DS, mm,

M<sub>s</sub> = massa original de sedimento em suspensão, mg, e

M<sub>e</sub> = massa de sedimento carreada, mg.

Se o material suspenso é depositado, um novo valor de DB (diâmetro sujeito a suspensão) é calculado pela formula:

$$DB_2 = \frac{DB_1 \cdot M_b + CRITD \cdot M_d}{M_b + M_d} \quad (D.30)$$

Onde:

$DB_2$  = novo valor do diâmetro DB, mm,

$DB_1$  = antigo valor do diâmetro DS, mm,

$M_b$  = massa original de sedimento depositado, mg, e

$M_d$  = massa de sedimento depositado, mg.