

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**DIAGNÓSTICO HIDROSEDIMENTOLÓGICO DA  
BACIA DO ARROIO CADENA – SANTA MARIA/RS**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**RÓBSON ILHA**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2014**



# **DIAGNÓSTICO HIDROSEDIMENTOLÓGICO DA BACIA DO ARROIO CADENA – SANTA MARIA/RS**

**Róbson Ilha**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Área de Concentração em Engenharia de Água e Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para a obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Agrícola**

**Orientador: Prof. Dr. João Batista Dias de Paiva**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2014**

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

Ilha, Róbson  
Diagnóstico Hidrossedimentológico da Bacia do arroio  
Cadena - Santa Maria/RS / Róbson Ilha.-2014.  
139 p.; 30cm

Orientador: João Batista Dias de Paiva  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-  
Graduação em Engenharia Agrícola, RS, 2014

1. Hidrossedimentologia 2. Transporte de Sedimentos  
em Suspensão 3. Área Urbana I. Paiva, João Batista Dias  
de II. Título.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE CÊNCIAS RURAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

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

**DIAGNÓSTICO HIDROSEDIMENTOLÓGICO DA BACIA DO  
ARROIO CADENA – SANTA MARIA/RS**

elaborada por  
**Róbson Ilha**

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

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

João Batista Dias de Paiva, Dr.  
(Presidente/Orientador)

Irani dos Santos, Dr. (UFPR)

Jean Paolo Gomes Minella, Dr. (UFSM)

Santa Maria, 20 de agosto de 2014



*Um homem precisa viajar. Por sua conta, não por meio de histórias, imagens, livros e TV. Precisa viajar por si, com seus olhos e pés, para entender o que é seu. Para um dia plantar as suas próprias árvores e dar-lhes valor. Conhecer o frio para desfrutar o calor. E o oposto. Sentir a distância e o desabrigo para estar bem sob o próprio teto. Um homem precisa viajar para lugares que não conhece para quebrar essa arrogância que nos faz ver o mundo como o imaginamos, e não simplesmente como é ou pode ser. Que nos faz professores e doutores do que não vimos, quando deveríamos ser alunos, e simplesmente ir ver.*

- Amyr Klink

*Determinação, coragem e autoconfiança são fatores decisivos para o sucesso. Não importam quais sejam os obstáculos e as dificuldades. Se estivermos possuídos de uma inabalável determinação, conseguiremos superá-los. Independentemente das circunstâncias, devemos ser sempre humildes, recatados e despidos de orgulho.*

- Dalai Lama



## AGRADECIMENTOS

A Deus;

Aos meus pais Jorge e Lourdete e aos meus irmãos Patrícia e Rafael pelo apoio incondicional, pelo amor e carinho;

À minha namorada, Juliana, pelo apoio em todos os momentos, amor, carinho e dedicação ao longo dos anos que compartilhamos;

Ao professor João Batista Dias de Paiva pela orientação durante a realização do trabalho, pelo apoio e confiança;

Aos colegas de Ghidros, pela constante troca de conhecimentos e pelos bons momentos vividos, em especial aos colegas Alencar, Fábio, Aline, Letícia, Marielle, Helenésio, Luiz Fernando e Deise, pela amizade e colaboração direta neste estudo;

Aos técnicos Alcides Sartori, José Astério Rosa do Carmo e André Collasiol pelo companheirismo, presteza e apoio nas atividades de campo e laboratoriais;

Aos bolsistas de iniciação científica Osmar e Roberta, pelo companheirismo e colaboração nas idas e vindas em dias de chuva;

A todos os meus amigos, por existirem, em especial aos amigos Mirdes, Matheus, Luciano, Norton, Corrêa e Marcos, pela coleção de histórias;

Aos colegas de mestrado, servidores do PPGEA e aos professores pelo incentivo e apoio;

À Universidade Federal de Santa Maria, pela qualidade do ensino público e gratuito;

À CAPES, pela bolsa de estudos concedida;

À FINEP e ao CNPq pelo financiamento deste estudo por meio do projeto *MAPLU2 (Manejo de Águas Pluviais em meio Urbanos 2)* ;

A todos aqueles, que de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho e não estão nominalmente citados;

Muito Obrigado!



## RESUMO

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

### DIAGNÓSTICO HIDROSSEDIMENTOLÓGICO DA BACIA DO ARROIO CADENA – SANTA MARIA/RS

AUTOR: Róbson Ilha

ORIENTADOR: João Batista Dias de Paiva

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 20 de agosto de 2014.

O constante crescimento das cidades junto com o processo de urbanização tem ocasionado grandes alterações no meio natural, sendo que parcela do problema é resultado da falta de conhecimento da dinâmica que os processos naturais possuem. Na cidade de Santa Maria o processo de adensamento populacional e expansão da área urbana foram responsáveis por diversas modificações, entre as quais se pode citar a substituição da vegetação por pavimentações, alterações na forma do relevo, poluição dos recursos hídricos e as mais diversas alterações nos canais de drenagem. Desse modo, estudos de quantidade de sedimentos em rios urbanos são absolutamente necessários para se gerar conhecimento e desenvolvimento tecnológico adequado para a minimização dos impactos causados ao ambiente. O objetivo desse estudo foi avaliar as relações, o comportamento espacial e temporal dos processos hidrossedimentológicos na bacia hidrográfica do arroio Cadena – Santa Maria/RS. A área de estudo do trabalho é a porção da bacia hidrográfica do arroio Cadena com exutório na seção Irmã Dulce e em duas bacias embutidas a essa. Foram realizadas medições de vazão e coleta de sedimentos em suspensão em três locais ao longo do canal para uma análise espacial dos dados. Na análise temporal foram considerados os dados obtidos na seção Walter Jobim que contava com um linígrafo. Buscou-se identificar as principais variáveis relacionadas à chuva e a vazão que controlam o transporte de sedimentos em suspensão nos eventos na bacia. Foi utilizado o coeficiente de Pearson para fazer essa verificação, seguido de uma tentativa de indicar um modelo estatístico. O arroio Cadena apresentou um alto teor de matéria orgânica presente nas amostras chegando até o valor de 88% do total da carga suspensa. Em oito dos doze eventos monitorados a concentração de matéria orgânica foi maior na seção mais a jusante, indicando um acréscimo ao longo do canal. A precipitação é menos influente no regime das vazões quando ela é inferior que sua média (137mm), sugerindo que nessa situação as contribuições oriundas da drenagem e sistemas de esgoto urbanos passam a exercer uma maior influência sob o regime das vazões. No período de estudo o arroio Cadena não apresentou tendência à erosão e nem a deposição do sedimento. Foi observado que nos meses de setembro a novembro há um significativo aumento na produção de sedimentos na bacia, fenômeno esse que faz parte da variabilidade intra-anual climática da região. As variáveis relacionadas à vazão e a precipitação dos eventos analisados apresentaram uma boa correlação com a concentração de sedimentos em suspensão medida ( $C_{ss_{medida}}$ ). O modelo de regressão simples entre a  $Q_{máx}$  e a  $C_{ss_{medida}}$  apresentou um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,78, sugerindo que a vazão máxima é uma boa indicadora do transporte de sedimentos em suspensão na bacia de estudo.

**Palavras-chave:** Hidrossedimentologia. Transporte de Sedimentos em Suspensão. Área Urbana.



## ABSTRACT

Master's Dissertation  
Post-Graduation Program in Agrícola Engineering  
Federal University of Santa Maria

### HYDROSEDIMENTOLOGICAL DIAGNOSIS OF THE CADENA STREAM BASIN – SANTA MARIA/RS

AUTHOR: Róbson Ilha  
ADVISOR: João Batista Dias de Paiva  
Place and date of defense: Santa Maria, August, 20<sup>th</sup>, 2014.

The steady growth of cities along with the urbanization process has caused major changes in the natural environment, being part of the problem is a result of lack of knowledge of the dynamics that natural processes have. In the city of Santa Maria the population density and expansion process of the urban area were responsible for several modifications, among which we can cite the replacement of vegetation with pavements, changes in the form of relief, pollution of water resources and the various changes in drainage channels. Thus, studies of sediment loads in urban rivers are absolutely necessary to generate knowledge and appropriate technology development to minimize impacts to the environment. The aim of this study was to evaluate the relationships, the spatial and temporal behavior of hydrosedimentological processes in the watershed of the stream Cadena - Santa Maria / RS. The study area is the portion of the watershed of the stream with Cadena flow in Irmã Dulce section and two basins built this. Flow measurements and collecting suspended sediments in three locations along the canal for a spatial analysis of the data were performed. Temporal analysis were considered in the data obtained from Walter Jobim section that had one limnigraf. Sought to identify the main variables related to rain and the flow that control the transport of suspended sediment in the events in the basin. Pearson's coefficient was used to make this check, followed by an attempt to indicate a statistical model. The Cadena stream showed a high content of organic matter present in the samples reaching a value of 88% of the total suspended load. In eight of the twelve events monitored the concentration of organic matter was higher in the most downstream section, indicating an increase along the channel. Rainfall is less influential in the regime of flows when it is lower than your average (137mm), suggesting that in this situation the contributions coming from the urban drainage and sewer systems begin to exert greater influence under the regime of flow. During the study period the stream Cadena no tendency to erosion or deposition of sediment. It was observed that in the months from September to November there is a significant increase in sediment yield in the basin, a phenomenon that is part of the intra-annual climate variability in the region. The variables related to flow and rainfall events analyzed showed a good correlation with the concentration of suspended sediment measured ( $C_{SS_{measured}}$ ). The simple regression model between  $Q_{max}$  and  $C_{SS_{measured}}$  showed a coefficient of determination ( $R^2$ ) of 0.78, suggesting that the maximum flow is a good indicator of the transport of suspended sediment in the basin study.

**Keywords:** Hidrossedimentology. Sediment Transport in Suspension. Urban Area.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Hidrograma de vazões em uma área urbana e em uma área rural nos EUA .....	32
Figura 2. Relação entre tipo de sedimento, condição de transporte e perfil de velocidade do fluxo .....	43
Figura 3. Distribuição dos sedimentos na vertical .....	43
Figura 4. Diagrama da distribuição da velocidade, concentração de sedimentos e descarga sólida. Fonte: Carvalho (2008, p. 78) .....	44
Figura 5. Relações entre produção de sedimento e área, com base em trabalhos de alguns países. Adaptado de Owens e Slaynaker (1992) .....	48
Figura 6. Bancos de areia, com vegetação, causados pelo assoreamento do arroio Cadena. ....	53
Figura 7. Cadena antes da proteção das margens. Fonte: Oliveira (2004). ....	54
Figura 8. Cadena após o revestimento das margens. ....	54
Figura 9. Área de estudo, a bacia do arroio Cadena .....	56
Figura 10. Uso e ocupação do solo, da bacia do arroio Cadena .....	56
Figura 11. Modelo numérico do terreno da bacia do arroio Cadena. ....	57
Figura 12. Pluviógrafo instalado na bacia do arroio Cadena .....	58
Figura 13. Seções hidrossedimentométricas, na bacia do arroio Cadena. ....	59
Figura 14. Enrocamento do leito no arroio Cadena. ....	59
Figura 15. Molinetes fluviométricos. Molinete Universal OTT operado com Guincho Hidrométrico (a); micro molinete operado a vau (b) .....	61
Figura 16. Amostradores de Sedimento em Suspensão. Amostrador AMS-3 com guincho hidrométrico (a); e amostrador AMS-1 (b) .....	61
Figura 17. Métodos de análise comumente utilizados. Fonte: DNAEE (2000) .....	63
Figura 18. Equipamentos e materiais utilizados no método da filtração .....	65
Figura 19. Delimitação dos eventos. ....	69
Figura 20. Ponte sobre a seção José Barin, no arroio Cadena. ....	77
Figura 21. Tentativa de análise de filtração .....	78
Figura 22. Diagrama de Caixa dos valores de C <sub>ss</sub> para os três locais de amostragem. ....	80

Figura 23. Trecho do arroio entre as seções JB e WJ. Ponto de assoreamento (a); evento observado no arroio onde a lamina d'agua cobre os pontos assoreados (b). .....	81
Figura 24. Correlação linear entre $C_{ss}$ e $Q$ , na seção transversal José Barin.....	82
Figura 25. Correlação linear entre $C_{ss}$ e $Q$ , na seção transversal Walter Jobim.....	82
Figura 26. Correlação linear entre $C_{ss}$ e $Q$ , na seção transversal Irmã Dulce. ....	83
Figura 27. Composição da carga suspensa na seção transversal José Barin.....	84
Figura 28. Composição da carga suspensa na seção transversal Walter Jobim.....	85
Figura 29. Composição da Carga Suspensa para a seção transversal Irmã Dulce..	85
Figura 30. Curva chave da vazão líquida para a seção Walter Jobim, no arroio Cadena.....	87
Figura 31. Precipitações acumuladas mensais para o período de estudo.....	88
Figura 32. Evento pluviométrico do dia 30/05/2012, maior chuva diária acumulada no período. ....	89
Figura 33. Vazões médias no período de estudo. ....	90
Figura 34. Hidrograma do mês de novembro de 2013. ....	91
Figura 35. Hidrograma para o mês de Agosto de 2012. ....	92
Figura 36. Curva Chave de Sedimentos.....	93
Figura 37. Concentração média de Sedimentos em Suspensão no período estudado .....	95
Figura 38. Evolução da produção de sedimentos em suspensão no arroio Cadena.	97
Figura 39. Hidrograma do evento 17. ....	99
Figura 40. Resultado das análises dos resíduos do modelo de regressão múltipla. a) e b) são os gráficos dos resíduos com os valores de $C_{ss}$ calculados e observados; c) plot normal dos resíduos e d) gráfico entre os valores calculados e observados.....	104
Figura 41. Regressão linear entre a $C_{ss_{medida}}$ e a $Q_{máx}$ em eventos para a bacia do Cadena.....	105

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação granulométrica de acordo com a American Geophysical Union. ....	42
Tabela 2. Percentuais de uso do solo para as bacias de estudo. ....	57
Tabela 3 – Coordenadas geográficas das seções no arroio Cadena.....	60
Tabela 4 – Variáveis utilizadas no estudo .....	71
Tabela 5 – Valores medidos de descarga líquida em 3 seções transversais no arroio Cadena .....	76
Tabela 6 – Variação em % das vazões entre as seções transversais estudadas .....	77
Tabela 7 – Concentração de sedimentos em suspensão (Css) e Vazão sólida (Qs) determinadas no período de estudo .....	79
Tabela 8 – Variação em porcentagem da Css entre as seções estudadas.....	80
Tabela 9 – Valores: Total precipitado, médios, máximos diários e desvio padrão da precipitação para o período estudado.....	89
Tabela 10 – Valores mensais mínimos, máximos e desvio padrão da vazão líquida ( $m^3.s^{-1}$ ) para o período estudado .....	90
Tabela 11. Correlações de Pearson ( $r^2$ ) entre Vazão líquida (Q) e a Precipitação (P), para as séries completas de Q e P, para os meses em que P foi maior que 137mm, e para os meses em que P foi menor que 137 mm. ....	93
Tabela 12 – Valores mensais mínimos, médios, máximos e desvio padrão da Css ( $mg.l^{-1}$ ) para o período estudado.....	95
Tabela 13 – Distribuição mensal da Produção de sedimentos em suspensão (Pss) .....	97
Tabela 14 – Características das variáveis analisadas para os eventos monitorados .....	100
Tabela 15 – Resultados do coeficiente de correlação de Pearson entre a variável dependente ( $Css_{medida}$ ) e as variáveis independentes. ....	101
Tabela 16 – Resultados do modelo de regressão múltipla.....	103
Tabela 17 – Resultados da regressão linear entre $Css_{medida}$ e $Q_{máx}$ para a bacia de estudo e resultados apresentados por Cardoso (2013) .....	105



## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

<b>Símbolo/Abreviatura</b>	<b>Descrição</b>
JB	Seção hidrossedimentométrica José Barin
WJ	Seção hidrossedimentométrica Walter Jobim
ID	Seção hidrossedimentométrica Irmã Dulce
Css	Concentração de sedimentos em suspensão
MO	Matéria orgânica
Cs	Carga suspensa
Q	Descarga líquida
Qs	Descarga sólida
Pss	Produção específica de sedimentos em suspensão
Css <sub>medida</sub>	Css medida durante o evento.
Qa	Vazão antecedente
Q <sub>a1</sub>	Vazão antecedente de 1 dia
API <sub>5</sub>	Índice de precipitação antecedente de 5 dias
API <sub>3</sub>	Índice de precipitação antecedente de 3 dias
API <sub>1</sub>	Índice de precipitação antecedente de 1 dia
Pt	Precipitação total do evento
t <sub>pico</sub>	Tempo de pico do evento
IP	Índice de precipitação
Q <sub>sup</sub>	Escoamento superficial
TiQ	Taxa de incremento de vazão
Q <sub>máx</sub>	Vazão máxima do evento
Q <sub>méd</sub>	Vazão média do evento



## LISTA DE ANEXOS E APÊNDICES

Anexo A – Tabela utilizada no ensaio de evaporação.....	125
Apêndice A – Hidrogramas mensais do período estudado.....	127
Apêndice B – Hidrogramas e Css medidos dos eventos monitorados.....	133
Apêndice C – Matriz de correlação linear de Pearson para os dados da Bacia.....	139



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>25</b>
1.1	Justificativa	26
1.2	Objetivo geral	27
1.3	Objetivos específicos	27
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>28</b>
2.1	Recursos hídricos e centros urbanos	28
2.1.1	Drenagem urbana	30
2.1.2	Retificação e revestimento de rios	33
2.2	Processos erosivos	34
2.2.1	Erosão fluvial	35
2.2.2	Erosão hídrica do solo	36
2.3	Erosão e sedimentos em áreas urbanas	37
2.4	Fluxo da descarga líquida no canal	39
2.5	Hidrossedimentologia	39
2.5.1	Transporte e depósito de sedimentos	41
2.5.2	Distribuição de sedimentos na seção transversal	44
2.5.3	Distribuição de sedimentos ao longo do curso d'água	44
2.5.4	Capacidade de transporte	45
2.6	Influência da escala espaço-temporal na produção de sedimentos	46
2.6.1	Escala espacial	47
2.6.2	Escala temporal	49
2.7	Variáveis de controle da produção de sedimentos em suspensão	50
2.8	A Bacia do arroio Cadena	51
<b>3</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b>	<b>55</b>
3.1	Área de Estudo	55
3.2	Monitoramento hidrossedimentológico	57
3.2.1	Dados pluviométricos	57
3.2.2	Seções hidrossedimentométricas	58
3.2.3	Dados Fluviométricos	60
3.2.4	Medidas de descarga líquida	60
3.2.5	Medidas de sedimentos em suspensão	61
3.3	Análises de laboratório	62
3.3.1	Ensaio de filtração	63
3.3.2	Ensaio de evaporação	65
3.4	Cálculo da descarga sólida em suspensão (Qs)	66
3.5	Cálculo da produção específica de sedimentos em suspensão (Pss)	66
3.6	Cálculo da curva chave da vazão líquida	67
3.7	Cálculo da curva chave de sedimentos	67
3.8	Variáveis de controle da C <sub>ss</sub> em eventos	68
3.8.1	Identificação e delimitação dos eventos	68
3.8.2	Descrição e cálculo das variáveis selecionadas	69
3.8.3	Tratamento estatístico	71
3.8.4	Análise de regressão	72
3.9	Organização dos resultados	73
3.9.1	Análise espacial	73
3.9.2	Análise temporal	73

<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>75</b>
<b>4.1</b>	<b>Caracterização espacial das características sedimentológicas do arroio Cadena .....</b>	<b>75</b>
4.1.1	Caracterização espacial da vazão líquida.....	75
4.1.2	Caracterização espacial do transporte de sedimentos .....	78
4.1.3	Composição da Carga Suspensa .....	83
<b>4.2</b>	<b>Variação temporal das características hidrológicas do arroio Cadena .....</b>	<b>86</b>
4.2.1	Curva chave da vazão líquida.....	86
4.2.2	Série temporal das precipitações.....	88
4.2.3	Série temporal das vazões líquidas .....	90
<b>4.3</b>	<b>Transporte de sedimentos em suspensão no período de maio/2012 – fev/2014 .....</b>	<b>93</b>
4.3.1	Curva chave de sedimentos .....	93
4.3.2	Série temporal da concentração de sedimentos em suspensão.....	94
4.3.3	Produção de sedimentos em suspensão.....	96
<b>4.4</b>	<b>Variáveis de controle da Css em eventos.....</b>	<b>98</b>
4.4.1	Modelo de regressão .....	102
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>107</b>
<b>6</b>	<b>DIFICULDADES ENCONTRADAS E RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>109</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>111</b>
	<b>ANEXO A .....</b>	<b>125</b>
	<b>APÊNDICE A.....</b>	<b>127</b>
	<b>APÊNDICE B.....</b>	<b>133</b>
	<b>APÊNDICE C.....</b>	<b>139</b>

# 1 INTRODUÇÃO

A contínua expansão das cidades junto com o processo de urbanização tem ocasionado grandes alterações no meio natural, sendo que parcela do problema é resultado da falta de conhecimento da dinâmica que os processos naturais possuem. Assim, estudos que aumentem o conjunto de informações sobre esses processos devem ser buscados visando racionalizar o uso dos recursos no caminho do desenvolvimento sustentável. A supressão de áreas verdes, a redução de áreas permeáveis e a canalização de corpos d'água são algumas ações desse tipo de urbanização que ignora, muitas vezes, padrões mínimos de saneamento.

Quando o histórico de grandes centros urbanos é analisado, a problemática nos recursos hídricos é recorrente. O estado da grande maioria dos córregos urbanos é de degradação ambiental, situação que foi e continua sendo equivocadamente sanada com o confinamento do corpo hídrico poluído em canais fechados de concreto.

Na cidade de Santa Maria o processo de adensamento populacional e expansão da área urbana foram responsáveis por diversas modificações, entre as quais se pode citar a substituição da vegetação por pavimentações, alterações na forma do relevo, poluição dos recursos hídricos e as mais diversas alterações nos canais de drenagem. Segundo Oliveira et al. (2006, p. 104) essas mudanças vêm ocorrendo ao longo da história da cidade de Santa Maria, mas intensificaram-se nos últimos trinta anos, quando a pressão sobre o ambiente natural tornou-se mais intensa, com o adensamento da ocupação nas áreas marginais aos canais fluviais e a incorporação de novas áreas ao espaço urbano.

Essas modificações sem qualquer planejamento aceleram os processos de erosão, transporte e deposição de sedimentos nos cursos d'água ocasionando problemas de erosão das margens do corpo hídrico e de assoreamento no canal. O assoreamento em certos locais pode causar enchentes e problemas para a navegação, e em reservatórios de água ocasionar a diminuição de sua vida útil. Além disso, o sedimento gera outras implicações ambientais quando em excesso, como a diminuição da fotossíntese em plantas aquáticas e a diminuição da qualidade da água para o consumo humano, e até animal. Assim, a produção de

sedimentos pode ser utilizada como um indicador dos impactos do homem nos recursos hídricos.

No Brasil os estudos e a disponibilidade de dados sobre sedimentos ainda são poucos (PARANHOS & PAIVA, 2005, p. 4). Apenas grandes rios possuem uma série longa de dados sedimentológicos monitorados no país, situação que gera um déficit de informações e conhecimento sobre a dinâmica sedimentológica em rios de médio porte e principalmente em rios de pequeno porte em ambientes urbanos. De acordo com Poletto (2004, p. 19) a complexidade dos processos erosivos e deposicionais dos sedimentos em bacias urbanas tornam seus estudos difíceis, e isso desperta o interesse de poucos pesquisadores dispostos a estudar esse tipo de ambiente.

Segundo Dotto (2007, p.111) 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. Desse modo, estudos de quantidade de sedimentos em rios urbanos são absolutamente necessários para se gerar conhecimento e desenvolvimento tecnológico adequado para a minimização dos impactos ocasionados pela interferência antrópica no meio ambiente.

## **1.1 Justificativa**

Todo curso d'água possui um comportamento hidrossedimentológico próprio, isto é, os processos de produção de sedimentos e deposição ao longo de uma bacia hidrográfica são fenômenos naturais. Entretanto, a inserção do homem e a execução de suas atividades econômicas causam alterações na drenagem, fluxo da descarga líquida e no fluxo de sólidos de uma bacia.

Na bacia do arroio Cadena essa situação não é diferente, as diversas modificações ocorridas na bacia quanto ao uso do solo, e as modificações no corpo hídrico tornam essa problemática em questão, e trazem dúvidas quanto ao comportamento dos processos hidrossedimentológicos na bacia.

Ciente de que o conhecimento desse comportamento constitui importante ferramenta de suporte a tomada de decisão para os diversos setores, optou-se por desenvolver este trabalho cujos objetivos serão apresentados na sequência do texto. O presente trabalho integra o projeto de pesquisa *Manejo de Águas Pluviais* da Chamada Pública MCT/MCIDADES/FINEP/Ação Transversal - Saneamento Ambiental e Habitação - 7/2009, na qual fazem parte 16 instituições de ensino superior brasileiras.

## **1.2 Objetivo geral**

Avaliar as relações, o comportamento espacial e temporal dos processos hidrossedimentológicos na bacia hidrográfica do arroio Cadena – Santa Maria/RS.

## **1.3 Objetivos específicos**

O objetivo geral é realizado por meio dos objetivos específicos.

- i) Caracterizar a dinâmica espacial dos processos sedimentológicos, avaliando a composição da carga suspensa transportada no canal;
- ii) Verificar a variação temporal das características hidrológicas na bacia hidrográfica de estudo;
- iii) Avaliar a evolução da produção de sedimentos em suspensão, identificando possíveis tendências de erosão e/ou assoreamento;
- iv) Determinar as variáveis com maior influência no transporte de sedimentos em suspensão a partir de dados de vazão e precipitação, indicando um modelo estatístico.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Recursos hídricos e centros urbanos

Os centros urbanos iniciaram o seu crescimento mais acelerado após a revolução industrial no século XIX, pois os atrativos como empregos e melhores condições de vida nas cidades ludibriavam a população do campo. Grandes centros urbanos desenvolveram-se nas proximidades de importantes fontes hídricas e, com o passar do tempo, o processo de urbanização se intensificou. Segundo o relatório da ONU (2007, p. 20), a população urbana no século XX cresceu de 220 milhões para 2,8 bilhões de habitantes, sendo que para 2008 a expectativa era de que ela passaria a população rural pela primeira vez na história.

O considerável crescimento observado também foi a fonte de significativos impactos ambientais e, em função da gênese relacionada com a água, dentre outras razões, a maioria das cidades apresenta algum problema que envolve os recursos hídricos. Price & Vojinović (2010) relatam essa problemática observada em algumas das metrópoles do mundo.

Para a América Latina as expectativas são de um crescimento urbano menos acelerado até 2030, em comparação com a África e a Ásia. No entanto, no Brasil, os desafios do crescimento sustentável das áreas urbanas continuarão sendo uma questão prioritária, haja vista a existência de severos impactos ambientais, cuja gênese está no modo como a urbanização se desenrolou no país.

No Brasil esse problema se evidenciou após a década de 60, com um grande aumento das cidades. Esse crescimento das cidades brasileiras não esteve aliado a medidas de planejamento, o que ocasionou um crescimento urbano acelerado e desordenado. Após a década de 80, ocorreu um agravamento com a redução de investimento, formando uma população urbana praticamente sem infraestrutura (TUCCI, 1995, p. 15).

Segundo Silveira (1998), o Brasil enfrentou um crescimento vertiginoso das metrópoles nacionais e regionais, isso fez com que sempre a capacidade de investimento em obras de saneamento (incluindo a drenagem urbana) fosse inferior

à expansão das cidades. Devido a esse problema, as redes de drenagem são concebidas sem uma visão global de bacia, sendo deficiente em critérios de projetos.

O meio urbano causa grandes modificações ao ciclo hidrológico da região em que se insere, pois além dos impactos qualitativos temos os impactos quantitativos causados pela modificação do uso do solo. A substituição da cobertura vegetal por elementos que impermeabilizam o solo e diminuem a capacidade de infiltração, interceptação e armazenamento da água da chuva pela vegetação, é responsável em parte pelo aumento do escoamento superficial. Fatores como tipo de vegetação, tipo de solo, condições topográficas, ocupação e uso do solo, são fatores que determinam a relação entre precipitação e vazão (CHOW, 1964 apud Barbosa, 1996).

Assim um fenômeno que se intensifica é a enchente urbana. A impermeabilização do solo causada, por exemplo, pela pavimentação de vias e a construção de telhados, reduz as áreas de infiltração, aumentando o volume e a velocidade da água que escoam superficialmente quando precipitações incidem sobre essas áreas (BUTLER & DAVIES, 2010, p. 2-4). Assim, durante eventos chuvosos, canais, antes naturais e agora confinados em tubos de concreto, elevam o nível das águas de maneira muito rápida, transportando grandes volumes que, se não excedem a calha projetada, alagam regiões à montante.

Os problemas enfrentados pelos centros urbanos com o aumento do escoamento superficial são de conhecimento de todos, principalmente quando ocorre uma catástrofe, mas as medidas que podem ser tomadas para remediar ou minimizar esses problemas não são utilizadas, testadas e aplicadas (GARCIA et al., 2004, p. 2). Pompêo (2000, p. 17) relata, segundo o documento intitulado “Consulta Nacional sobre a Gestão do Saneamento e do Meio Ambiente Urbano”, que na drenagem e controle de cheias de áreas urbanas as ações são emergenciais, esporádicas e quase sempre definidas após a ocorrência de desastres.

Poleto (2011, p. 360) ressalta que um dos grandes problemas verificados nas bacias hidrográficas urbanas brasileiras se refere à quantidade de resíduos sólidos, esgoto doméstico e sedimentos que são lançados aos rios e corpos d'água que drenam essas bacias. Segundo Nascimento & Heller (2005, p. 38), a urbanização produz impactos distintos de natureza física, química e biológica sobre os meios receptores, no contexto da própria área urbana e a jusante dela. Dessa forma, os

rios ao passarem por áreas urbanas recebem uma carga poluente de grandes proporções que causam alterações na qualidade da água, na biota aquática, na morfologia fluvial e no regime hidrológico (MARTÍNEZ & POLETO, 2010, p. 2).

Os Planos Diretores carecem de uma visão integrada da bacia, sendo as ações para o controle de enchentes, tomadas para resolver problemas isolados (OSTROWSKY, 2003). Os problemas são resolvidos por um curto período, por meio de obras emergenciais. Isso ocorre porque não existe nenhum programa sistemático, em qualquer nível, para o controle de ocupação das áreas de risco de inundação no Brasil, e sim, apenas poucas ações isoladas de alguns profissionais (TUCCI, 1995, p. 16). Garcia (2005) relata que isso é ocasionado por fatores como: a falta de conhecimento sobre controles de enchentes por parte dos planejadores urbanos, a desorganização a nível federal e estadual sobre controles de enchentes, a pouca informação técnica sobre o assunto em nível de graduação na Engenharia, o desgaste político para o administrador resultante do controle não estrutural (zoneamento) e a falta de educação da população sobre o controle de enchentes.

Araújo et al. (1999) apontam que a falta de planejamento na ocupação das áreas urbanas resulta em alterações significativas nas taxas de impermeabilização das bacias, ocasionando transtornos e prejuízos em razão do aumento significativo das inundações, devido o aumento das vazões máximas e a redução do tempo de concentração e do volume escoado. O volume que escoava lentamente no solo e ficava retido pela vegetação e em depressões, passa a escoar em canais, exigindo maior capacidade de escoamento das seções.

### 2.1.1 Drenagem urbana

Como o desenvolvimento urbano ocorreu de forma não planejada e muito acelerada, não foi possível o crescimento proporcional da infraestrutura urbana, principalmente na década de 80, quando os investimentos foram reduzidos (TUCCI, 1995, p. 15).

Os impactos sobre a população são causados pela ocupação inadequada do espaço urbano. Isto decorre do fato do plano diretor urbano de quase totalidade das cidades não possuir restrições quanto ao loteamento das áreas de riscos de

inundação. Alguns anos sem enchentes é razão suficiente para que sejam loteadas áreas inadequadamente. Ocorre também nas cidades sul americanas, a ocupação ilegal de áreas ribeirinhas de domínio público pela população de baixo poder aquisitivo (TUCCI & BERTONI, 2008).

As inundações devido ao desenvolvimento urbano ocorrem em função da remoção da vegetação, da impermeabilização e ocupação do solo e da construção de redes de condutos pluviais, canalização ou obstruções do escoamento, que aceleram e aumentam a quantidade de água que chega ao mesmo tempo no sistema de drenagem, produzindo inundações mais frequentes (KONRAD, 2003 e TUCCI & BERTONI, 2008).

Segundo Toy (2010, p.32) os prejuízos devidos às inundações nas cidades brasileiras têm aumentado exponencialmente, reduzindo a qualidade de vida e o valor das propriedades. Este processo é decorrência da urbanização e a consequente impermeabilização junto com a canalização do escoamento pluvial. As obras e o controle público da drenagem têm sido realizados por uma visão local e setorializada dos problemas, gerando mais impactos do que os pré-existentes e desperdiçando os poucos recursos existentes nas cidades (TUCCI, 2003, p. 37).

O escoamento pluvial pode produzir inundações e impactos nas áreas urbanas em razão de dois processos, que ocorrem isoladamente ou combinados (TUCCI, 2008, p. 471):

**Inundações de áreas ribeirinhas:** são inundações naturais que ocorrem no leito maior dos rios por causa da variabilidade temporal e espacial da precipitação e do escoamento na bacia hidrográfica;

**Inundações em razão da urbanização:** são as inundações que ocorrem na drenagem urbana por causa do efeito da impermeabilização do solo, canalização do escoamento ou obstruções ao escoamento (TUCCI, 2008, p. 471).

Segundo Tucci (2012, p. 627-630) as medidas de controle de inundações podem ser classificadas em estruturais, quando o homem modifica o rio, e em não estruturais, quando o homem convive com o rio. No primeiro caso, estão as medidas de controle através de obras hidráulicas, tais como barragens, diques, canalizações, entre outras. No segundo caso, encontram-se medidas do tipo preventivo, tais como zoneamento de áreas de inundação, alerta e seguros. Ainda segundo o autor as medidas estruturais envolvem custos maiores que as medidas não estruturais

Hidrogramas das descargas líquidas em ambientes urbanos possuem formas diferentes em relação aos de ambientes rurais. A figura 1 ilustra os hidrogramas de descarga líquida de duas bacias com áreas semelhantes nos Estados Unidos da América, onde Mercer Creeck é uma área urbana e Newaukun Creeck é uma área rural. Essas mudanças ocorridas nos hidrogramas em áreas urbanas deverão se refletir em problemas para todo o ambiente, seja ele terrestre ou aquático.

O aumento das áreas impermeabilizadas, combinado com o sistema de drenagem urbana, pode ocasionar também um aumento no transporte de poluentes pelo escoamento superficial. Além disso, outras consequências, como a deformação da calha fluvial, provocada pela necessidade desta em se ajustar a um maior volume escoado, salienta que os efeitos prejudiciais da urbanização sobre o ecossistema aquático começam a surgir quando a bacia hidrográfica atinge um grau de impermeabilização de 12% (MARTINEZ, 2010, p. 22).

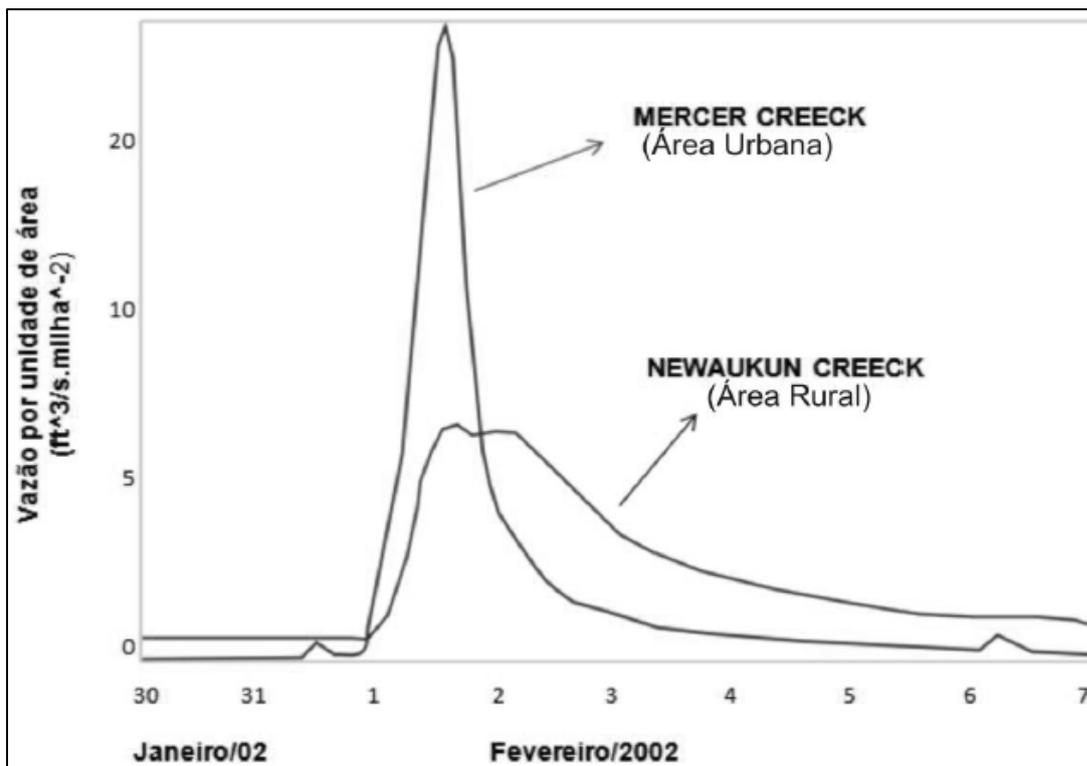


Figura 1. Hidrograma de vazões em uma área urbana e em uma área rural nos EUA  
Fonte: USGS (2003)

### 2.1.2 Retificação e revestimento de rios

Entre as medidas intensivas de controle de inundação com obras hidráulicas encontradas na literatura, serão destacadas nesse texto as obras de revestimento das margens e do leito e de retificação do rio.

Para a seção de um rio que escoar uma vazão  $Q$ , a cota resultante depende da área da seção, da rugosidade, raio hidráulico e da declividade. Para reduzir a cota devido a uma vazão pode-se atuar sobre as variáveis mencionadas (TUCCI, 2012, p. 637). Ainda segundo o autor, aprofundando o canal, a linha de água é rebaixada evitando inundação, mas as obras poderão envolver um trecho muito extenso para ser efetivo, o que aumenta o custo. A ampliação da seção produz redução da declividade da linha de água e redução dos níveis para a montante. Estas obras devem ser examinadas quanto à alteração que podem provocar na energia do rio e na estabilidade do leito. Os trechos de montante e jusante das obras podem sofrer sedimentação ou erosão de acordo com a alteração produzida.

O pensamento amplamente difundido no Brasil, baseado na adaptação da hidrografia ao sistema de mobilidade urbana, fez com que vários rios urbanos sofressem intervenções drásticas de retificação de seus meandros (MENDES et al., 2004, p.17). Com a retificação do rio a velocidade do escoamento aumenta, tendendo a um ganho de energia, podendo ocasionar problemas de erosão na calha do rio a jusante do trecho modificado.

Conforme Brookes (1988, p. 326) os processos de canalização envolvem o alargamento e aprofundamento da calha fluvial, retificação do canal, construção de canais artificiais e de diques, proteção de margens e remoção de obstáculos de canal. As referidas obras de engenharia modificam a calha do rio, causando impactos no canal e na planície de inundação.

A retificação dos canais fluviais é considerada obra de engenharia imprópria e com efeitos prejudiciais ao ambiente (Keller, 1981, p. 230). O canal retificado gera inúmeros impactos geomorfológicos: a redução do comprimento do canal muda o padrão de drenagem com a perda dos meandros; altera a forma do canal com o aprofundamento e alargamento do rio; diminui a rugosidade do leito e aumenta seu gradiente.

O rio transforma energia potencial em cinética, ou seja, deriva da energia potencial proveniente da precipitação nos divisores d'água e a converte em cinética para movimento sendo dissipada na erosão e deposição de sedimentos do leito e margens, além do atrito em partículas do fluido e com o leito, evaporação, etc. As intervenções humanas locais no curso d'água, como a retificação, interferem no conjunto de suas características locais e o rio no seu conjunto.

Outro problema ocasionado pelas referidas obras hidráulicas está relacionada à fauna desses ecossistemas. Os rios estão permanentemente sujeitos à ocorrência de modificações no seu curso natural. As possibilidades de modificações naturais dos cursos d'água são fortemente limitadas em rios retificados e mantidos por obras hidráulicas. Este fato impede a renovação natural dos núcleos biológicos, das estruturas e das condições específicas das diversidades da biota. A ocorrência natural de seixos rolados é responsável pela manutenção do ciclo vital de espécies, principalmente da fauna bentônica (SEA, 2001, p. 9-10).

## **2.2 Processos erosivos**

Fundamentalmente, o processo de erosão hídrica do solo pela água da chuva é condicionado pelos fatores chuva, solo, topografia, cobertura, manejo e práticas conservacionistas de suporte (HUDSON, 1977, p. 320). No meio natural, o destaque da partícula no processo da erosão ocorre por meio da energia de impacto da gota de chuva e pelas forças geradas devido à ação do escoamento das águas (CARVALHO, 2008, p. 39). O tipo de erosão trabalhado neste contexto é conhecido como erosão hídrica, que passa por estes três processos fundamentais, desagregação, transporte e deposição das partículas de solo (CAPECHE et al, 2008, p. 115).

Estas erosões se classificam em laminar e linear. A erosão laminar ocorre quando o escoamento das águas pluviais é caracterizado de forma homogênea na superfície dos solos, sem formar canais definidos. A erosão linear se caracteriza por formar os canais de escoamento definidos dando origem a três tipos sequentes de erosão, sendo elas os sulcos que formam incisões nos solos de até 0,5 m de profundidade; as ravinas são caracterizadas a partir de uma profundidade no solo

superior a 0,5 m e são de forma retilínea, alongada e estreita; e as voçorocas que são o estágio mais avançado de uma erosão, estas se formam ao atingir o lençol freático (SANTORO, 2009, p. 60).

Muller (1995, p. 412) ressalta que a erosão é um problema de duas faces: a primeira deve-se ao fato da mesma dilapidar camadas férteis de solos, prejudicando terrenos utilizados para agricultura; e a segunda quanto à deposição dos materiais erodidos em leitos de rios e reservatórios interferindo nas funções e utilizações dos mesmos. Do mesmo modo, Branco et al (1998, p. 445) citam que os processos erosivos removem as camadas superficiais dos solos reduzindo a produtividade dos mesmos e que os sedimentos originados através destes processos, além de prejudicar a qualidade das águas, servem como veículo a outros poluentes (como fertilizantes ou produtos químicos) que são absorvidos a estes materiais.

Os processos erosivos também provocam outros problemas em cursos d'águas e reservatórios, como: aumento dos custos de tratamento de água, desequilíbrio do balanço de oxigênio dissolvido na água, danos no crescimento e desenvolvimento de espécies aquáticas (devido à turbidez da água e redução da capacidade de propagação da luz, entre outros), diminuição da capacidade de armazenamento dos reservatórios e conseqüente redução do potencial de geração energia elétrica (BARROSO & SILVA, 1992, p. 20).

### 2.2.1 Erosão fluvial

A erosão fluvial que ocorre nos cursos d'água, pode se processar por meio de escavações locais ou geralmente como erosão de leito e erosão de margem (CARVALHO, 2008, p. 39). A erosão fluvial é aquela que se processa de modo contínuo e espontâneo pela ação das correntes dos rios. É de grande interesse na morfologia fluvial podendo explicar a formação dos rios e da rede hidrográfica, sendo responsável pelo aprofundamento e alargamento dos rios.

Esse tipo de erosão pode ser intensificado pela ação antrópica com a retirada da mata ciliar, diminuindo a rugosidade do canal, resultando, portanto, no aumento da velocidade de escoamento e no potencial erosivo do rio. A erosão fluvial é realizada através de três processos principais: corrosão, corrasão e cavitação.

A **corrosão** engloba todo e qualquer processo químico que se realiza como reação entre a água e as rochas superficiais que com ela estão em contato. A **corrasão** é o desgaste pelo atrito mecânico, geralmente através do impacto das partículas carregadas pela água. [...] O terceiro processo, a **cavitação**, ocorre somente sob condições de velocidades elevadas da água, quando as variações de pressão sobre as paredes do canal facilitam a fragmentação das rochas (CHRISTOFOLETTI, 1980, p. 74-75).

### 2.2.2 Erosão hídrica do solo

A erosão do solo é considerada um processo físico, que envolve a desagregação, o transporte e a deposição de partículas do solo pela ação dos agentes de erosão (BERTONI & LOMBARDI NETO, 1985, p. 392). A erosão hídrica é mais evidente em regiões de alta precipitação pluviométrica, em área com solo exposto sem cobertura vegetal, sendo mais intensa nos locais com declividade acentuada (RIGHS & SILVA, 2009, p. 155).

Para Camapum et al. (2006) as erosões se classificam quanto à forma como surgiram, e podem se dividir em dois grandes grupos: a erosão natural ou geológica e a erosão antrópica ou acelerada, sendo a geológica ocasionada por fatores naturais, enquanto a antrópica esta relacionada a ação humana.

O processo de erosão resulta de duas formas de ocorrência: da erosão em entressulcos e da erosão em sulcos, dependendo das condições superficiais em que ocorrem e da forma de atuação do agente erosivo (SILVA et al., 2005, p. 144-153). Segundo Pereira et al. (2003, p. 424), a erosão entressulcos é descrita como o processo de desprendimento das partículas de solo pelo impacto das gotas da chuva, seguido do transporte das partículas pelo escoamento superficial e pela deposição dos sedimentos nos pequenos sulcos ou canais.

A erosão no sulco é resultante do acúmulo da enxurrada em pequenas irregularidades no sentido do declive do terreno, a ponto de atingir volume e velocidade suficientes para formar canais mais ou menos profundos (BERTONI & LOMBARDI NETO, 2005, p. 125). Esta forma de erosão é função da capacidade do escoamento em desprender os sedimentos, da capacidade de transporte do escoamento e da carga de sedimentos existentes no escoamento, em que a maior

parte do solo é perdida em pequenos sulcos que se formam em decorrência do escoamento superficial; esta é, também, a maneira de erosão mais característica e por isso mesmo mais percebida em áreas submetidas ao processo erosivo.

### **2.3 Erosão e sedimentos em áreas urbanas**

Como já visto anteriormente, a erosão é um fenômeno resultante da desagregação, transporte e deposição das partículas de solo pela ação da chuva, escoamento superficial ou do vento. A erosão ocorre quando o solo permanece desnudo e exposto à ação abrasiva dos ventos e da água (CRAUL, 1999, p. 21). Obras como cortes e aterros podem tornar estes locais mais suscetíveis à erosão. A retirada da mata ciliar, depósitos irregulares de lixo e alta impermeabilização da bacia urbana, aumentam o transporte e sedimentação das partículas de solos afetando a frequência e intensidade das inundações em cursos d'água (ROBAINA et al., 2001, p. 140).

Segundo Craul (1999, p. 22) o controle da erosão em solos urbanos pode ser realizado por meio do agendamento dos trabalhos em épocas não chuvosas, redução do tempo de início e fim das obras de corte e aterro, cobertura do solo e controle do fluxo de água dentro do terreno. É inevitável que o solo fique exposto durante os trabalhos de construção, entretanto, é essencial que a área exposta seja minimizada, bem como o seu tempo de exposição (USDA, 2000).

Assim como a erosão, os deslizamentos de solos são fenômenos naturais que atuam na formação da paisagem em relativo equilíbrio com o ecossistema. Entretanto, as atividades humanas não planejadas como a ocupação inadequada de solos (isto é, sem observância de sua aptidão de uso) têm acelerado intensamente estes fenômenos (BERGER, 2001, p. 15), modificando o comportamento hidrológico do solo, favorecendo a instabilidade e seu deslizamento morro abaixo. A falta de uma legislação apropriada e ações governamentais são responsáveis, em grande parte, pela frequência destes acontecimentos. A estabilidade de encostas depende da presença da vegetação protegendo o solo da ação das gotas de chuvas, favorecendo a infiltração de água e promovendo coesão entre as partículas de solo, aumentando sua resistência à erosão.

Segundo Poletto (2007, p. 2) a falta de um rígido controle contra erosões hídricas e a falta de obras que armazenem os sedimentos oriundos dos pavimentos (caixas de areia) transformam as áreas urbanas em grandes produtoras de sedimentos e outros poluentes, que são transportados diretamente para a calha fluvial por meio da rede de drenagem. Ainda segundo o mesmo autor os sedimentos que atingem os corpos d'água por sua vez causam problemas de ordem física (instabilidade da calha fluvial, assoreamento) e de ordem química (transferência de poluentes e nutrientes da bacia vertente para os corpos d'água) que podem ser transportados a longas distâncias nos rios.

Segundo Carvalho (2008, p. 12), os sedimentos não são somente um dos maiores poluentes da água, mas também servem como catalisadores, carreadores 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, infraestruturas hidroelétricas e vida aquática. Adicionalmente, produtos químicos e resíduos sólidos são assimilados ao redor e dentro das partículas de sedimento. Trocas iônicas podem ocorrer entre o soluto e o sedimento. As partículas de sedimento agem como potencializadores dos problemas causados por agentes químicos decorrentes dos resíduos sólidos, tóxicos, nutrientes, bactérias patogênicas, vírus, etc (DOTTO, 2006, p. 26).

Em áreas urbanas, os sedimentos originados de restos de materiais da construção civil também podem ser frequentemente encontrados nos corpos d'água. Os estudos de Björk (1979) mostraram que as altas concentrações de cálcio encontradas no Lago Paranoá, em Brasília, eram provavelmente devido a sedimentos provenientes da construção civil. Estudos mais complexos como os apresentados por Ono et al. (2000) mostraram correlações positivas entre os sedimentos gerados pela construção civil e genotoxicidade (danos causados ao DNA).

Dessa forma, como reporta a literatura, o uso dos sedimentos como um indicador da poluição para projetos de drenagem urbana é bastante significativo. Muthukaruppan et al. (2002) comentam que as cargas poluentes podem variar consideravelmente em áreas urbanas, sendo que as duas principais causas de variação são o tipo de uso do solo e as condições socioeconômicas.

Assim sendo, a minimização dos impactos causados pelos sedimentos na rede de drenagem e nos cursos d'água requer a realização de estudos de

caracterização, propagação e quantificação dos sedimentos nas áreas urbanas.

## **2.4 Fluxo da descarga líquida no canal**

Todo o trabalho realizado por um rio provém da transformação da energia potencial em cinética que ocorre ao longo de seu perfil longitudinal. Essa energia é responsável desde a erosão do substrato, o transporte de água e sedimento, a deposição temporária da carga sedimentar, a construção e modificação das estruturas (canais e planícies de inundação), até a sustentação da ecologia fluvial e a geração de energia elétrica ou mecânica.

Por sua vez, o fluxo de um canal, segundo Christofolletti (1981), está condicionado à força gravitacional e à fricção. A força de gravidade atua de forma que a água das partes mais altas seja conduzida às partes mais baixas do relevo. Por outro lado, a força de fricção atua nos limites do canal contra o fluxo da água provocando um efeito de retardamento. No canal, propriamente dito, o efeito de fricção é exercido pelo leito e margens, no entanto, o fluxo sofre mais outro tipo de fricção, embora bem menos expressivo, que é na superfície, no contato água e ar.

Dessa forma as modificações estruturais comumente realizadas em meios urbanos, especificamente as obras de enrocamento (maciço formado por rochas compactadas) e revestimento do leito e das margens são eficientes no que se refere a diminuir a velocidade da água, pois a rugosidade do canal é aumentada com essas intervenções. Porém outros agravos podem ocorrer, como o aumento do depósito de sedimentos em longos trechos do corpo hídrico

## **2.5 Hidrossedimentologia**

A erosão, transporte e deposição do material erodido em leitos de corpos hídricos é comprovadamente um processo natural. A utilização indevida do solo tem uma contribuição altamente negativa, podendo acelerar esse processo. A medição e coleta de informações em campo são importantes, por permitirem a avaliação ao

longo do tempo dos impactos resultantes das atividades antrópicas sobre a produção, transporte e deposição de sedimentos nos leitos dos cursos d'água situados a jusante.

A sedimentologia vem ao longo dos anos se tornando fundamental, devido ao fato dos sedimentos serem prejudiciais a projetos e operações de obras hidráulicas, bem como a conservação dos solos e recursos hídricos, pois é através dela que se buscam soluções para problemas como assoreamento de reservatórios, mudança da seção de rios, diminuição da qualidade da água, entre outros. Segundo Carvalho (2008, p. 3), sedimento pode ser descrito como a partícula derivada de rochas ou de materiais biológicos que pode ser transportado por fluido (como a água e o vento) do seu ambiente de origem para os locais de deposição. De acordo com o mesmo autor, a disciplina que estuda os sedimentos é a sedimentologia que tem como base os processos hidroclimatológicos e quando restrita aos cursos d'água e lagos recebe o nome de hidrossedimentologia. Entre as diversas aplicações da sedimentologia, uma das mais difundidas é a avaliação do assoreamento e da vida útil de reservatórios.

A erosão, que corresponde à separação e remoção das partículas das rochas e dos solos devido à ação das águas, dos ventos, entre outros, é o processo inicial da sedimentação e representa a origem dos problemas derivados do sedimento no meio ambiente (CARVALHO, 2008, p. 4). Os sedimentos erodidos removem a matéria orgânica do solo, degradando sua estrutura e reduzindo sua fertilidade. Carreando nutrientes, particularmente fósforo, contribuem para a eutrofização de riachos e reservatórios. Absorvendo pesticidas são agentes catalisadores e carreadores diminuindo a qualidade da água de superfície (ELLIOT e WARD, 1995, p. 462).

A deposição de sedimentos tem sua maior importância no estudo de assoreamento de reservatórios, devido ao fator inevitável de que com a construção de um barramento no curso d'água ocasionará a diminuição da velocidade de fluxo, ocasionando maior sedimentação das partículas em suspensão nos seus diversos tamanhos.

Apesar dos diversos problemas que podem ser ocasionados pela presença excessiva de sedimentos nos cursos d'água, seu fluxo é fundamental para a manutenção dos ambientes naturais. Eles transportam nutrientes importantes para a manutenção da flora e da fauna aquática e das margens, constituem e mantêm

praias em rios, além do equilíbrio dos fluxos sólido e líquido entre os continentes e as zonas costeiras.

### 2.5.1 Transporte e depósito de sedimentos

Além da água, o fluxo fluvial transporta uma grande quantidade de material de origem mineral (derivado do substrato rochoso ou pedogênico) e orgânico (proveniente dos organismos associados ao sistema como algas, organismos bênticos, folhas, etc.).

Conforme Richards (1982) e Knighthon (1998), a carga suspensa é originada em sua maioria do escoamento superficial das vertentes (fluxo hortoniano e acanalado de vertente) e secundariamente da erosão das margens do canal. É constituída por silte e argila e se mantêm em suspensão praticamente o tempo todo devido à turbulência do fluxo, depositando-se apenas em condições de fluxo laminado de baixíssimas velocidades.

A fração areia (muito fina a fina) pode estar presente na carga suspensa, mas sua permanência nessa condição é instável e varia de acordo com a própria oscilação da velocidade do fluxo aquoso (BRAVARD e PETIT, 2000). Também fazem parte da carga suspensa do rio o material particulado de origem orgânica derivado de fontes terrestres e aquáticas como algas, organismos microscópicos, além dos fragmentos vegetais de origem variada que, em algumas situações específicas, podem predominar sobre o particulado mineral (argila, silte e areia).

O material transportado permanece em suspensão devido aos vórtices ascendentes que dominam o fluxo turbulento. A presença das partículas maiores que areia muito fina (Tabela 1) na carga suspensa do rio é bastante variável e uma determinada porcentagem da carga transportada passa frequente e gradativamente de carga suspensa para carga de fundo. Assim, pequenas alterações na velocidade do fluxo podem alterar a composição da carga suspensa de um rio.

O transporte de sedimento é um fenômeno complexo que depende de processos erosivos que ocorrem nas vertentes da bacia e no leito e margens dos rios, que fornecem material que, por sua vez, dependem da energia do fluxo para serem transportados (Santos *et al.*, 2001, p. 371). Segundo Carvalho (2008, p. 74),

as forças que atuarão no sedimento podem mantê-lo em suspensão ou no fundo do rio. Esta situação se dará em função das características das partículas (tamanho, peso e forma); e propriedades do escoamento (laminar ou turbulento, velocidade da corrente, obstáculos do leito entre outros).

As partículas mais pesadas são deslocadas sobre o fundo por rolamento, deslizamento ou saltos curtos. As partículas mais leves são deslocadas em suspensão (Figura 2). Assim o depósito irá ocorrer quando a partícula tiver uma parada total do seu movimento.

Tabela 1 – Classificação granulométrica de acordo com a American Geophysical Union.

Diâmetros (mm)	Denominações
<b>64 – 32</b>	Cascalho muito grosso
<b>32 – 12</b>	Cascalho grosso
<b>16 – 8</b>	Cascalho médio
<b>8 – 4</b>	Cascalho fino
<b>4 – 2</b>	Cascalho muito fino
<b>2,00 – 1,00</b>	Areia muito grossa
<b>1,00 – 0,50</b>	Areia grossa
<b>0,50 – 0,25</b>	Areia média
<b>0,25 – 0,125</b>	Areia fina
<b>0,125 – 0,0625</b>	Areia muito fina
<b>0,0625 – 0,031</b>	Silte grosso
<b>0,031 – 0,016</b>	Silte médio
<b>0,016 – 0,008</b>	Silte fino
<b>0,008 – 0,004</b>	Silte muito fino
<b>0,004 – 0,0020</b>	Argila grossa
<b>0,0020 – 0,0010</b>	Argila média
<b>0,0010 – 0,0005</b>	Argila fina
<b>0,0005 – 0,00024</b>	Argila muito fina

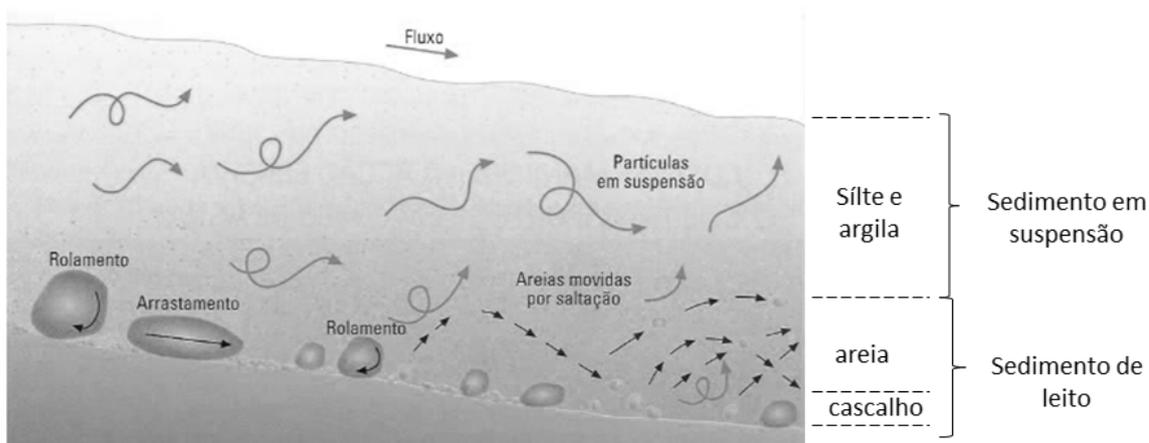


Figura 2. Relação entre tipo de sedimento, condição de transporte e perfil de velocidade do fluxo  
Fonte: Modificado de Carvalho (2008)

Estando a partícula do sedimento sujeita a ação da velocidade da corrente, e do seu peso, sua variação de distribuição dentro do fluxo d'água variará conforme demonstra a figura 3 (CARVALHO, 2008, p. 77). A concentração do sedimento apresenta um mínimo na superfície e um máximo perto do leito, para uma granulometria variada. As partículas mais grossas do sedimento em suspensão, geralmente areias, apresentam uma variação crescente da superfície para o leito. As partículas finas como silte e argila, têm uma distribuição aproximadamente uniforme na vertical.

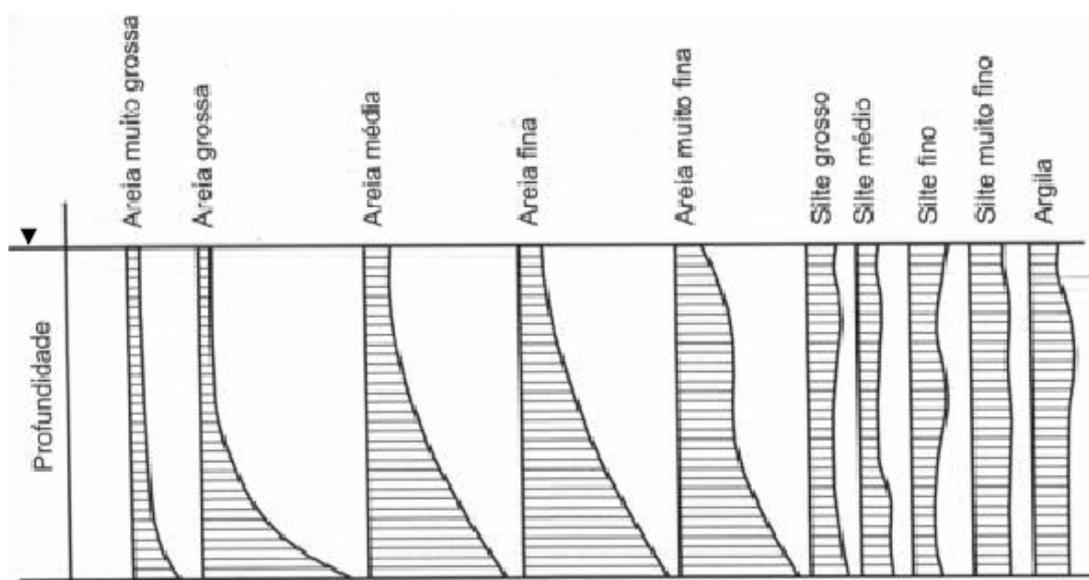


Figura 3. Distribuição dos sedimentos na vertical  
Fonte: Carvalho (2008)

### 2.5.2 Distribuição de sedimentos na seção transversal

A distribuição de sedimentos na seção transversal de um rio, assim como na vertical, é variável sendo melhor representada pela concentração. Segundo Carvalho (2008, p. 78) esta é variável em função da velocidade da corrente, da disponibilidade de sedimentos e de sua granulometria. Considerando que as velocidades são menores perto das margens. As concentrações, também, são menores, aumentando para o centro e depois diminuindo na direção da outra margem. Ainda segundo o mesmo autor, as velocidades da corrente na vertical são variáveis, decrescendo para o leito, permitindo que o peso da partícula seja um fator na variação da concentração. Essa distribuição pode ser visualizada na figura 4.

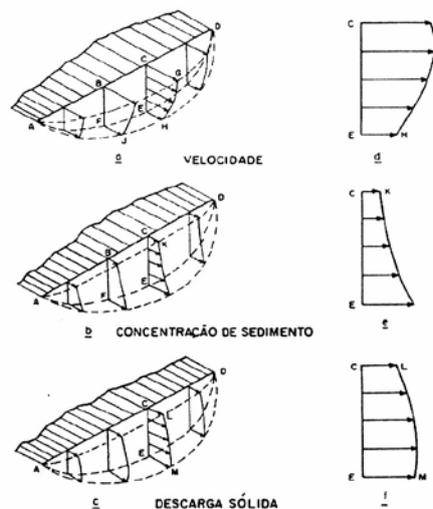


Figura 4. Diagrama da distribuição da velocidade, concentração de sedimentos e descarga sólida. Fonte: Carvalho (2008, p. 78)

### 2.5.3 Distribuição de sedimentos ao longo do curso d'água

As cabeceiras dos rios são compostas por sedimentos de tamanhos maiores, como pedras, pedregulhos e seixos (CARVALHO, 2008, p. 79). Segundo este autor, à medida que são transportados, esses materiais vão se fracionando,

transformando-se em sedimentos de granulometria menor, passando a areia grossa, média e fina gradativamente para jusante, para baixo do curso.

Os sedimentos mais finos são transportados em suspensão, enquanto os mais grossos são transportados nos leitos, como já visto anteriormente neste trabalho. Carvalho relata ainda, que à medida que o curso d'água se desenvolve para jusante, mais material fino é produzido, sendo que parte dele vai sendo depositada nas margens em forma de lama.

#### 2.5.4 Capacidade de transporte

A quantidade de sedimentos transportada varia a cada curso d'água. Carvalho (2008, p. 6) relata que um fluxo de água com certa vazão tem a capacidade de transportar certa quantidade máxima de material sólido, que é conhecido como valor de saturação ou capacidade de transporte. Essa capacidade depende de diversos fatores como: a vazão e a declividade do curso d'água; e o tipo, a granulometria e o peso específico do sedimento. Ainda segundo o autor, caso a quantidade de material transportado seja maior que a capacidade de transporte, haverá formação de depósito. Se for menor, haverá tendência à erosão.

No primeiro caso, com a carga sólida do rio elevada, o leito começa a se elevar devido à grande sedimentação, sendo que enchentes podem se tornar mais frequentes devido à diminuição de capacidade da calha.

No segundo caso, com quase nenhuma carga sólida no rio, as margens e leito começam a ser erodidos, caso não sejam suficientemente resistentes. Este fenômeno ocorre à jusante de uma barragem cujo reservatório sempre retém o sedimento, tornando a água limpa. (CARVALHO, 2008, p 6)

Bordas e Semmelmann (2012, p. 925) explicam que o conhecimento da capacidade de transporte que importaria expressar está, portanto, intimamente ligado ao conhecimento da dissipação de energia por atrito e por suspensão.

Segundo Medeiros (2007, p.223), o aumento da vazão de um rio intensifica a velocidade do escoamento fluvial, a capacidade de transporte do rio e a lavagem das margens, incrementando o material particulado e dissolvido transportado.

Em rios as atividades que causam grandes impactos no canal são obras de drenagem e barragens. A canalização e dragagem de rios aumentam a amplitude e o aporte de água, sedimentos, e nutrientes. Ao contrário, barragens retêm e transformam o material, e modificam a pulsação natural do fluxo de água e material associado, alterando a capacidade de transporte dos mesmos e podendo ainda provocar erosão à jusante (SOUZA, 2011, p.119).

Embora as intervenções antrópicas ajam direta e indiretamente na modificação dos rios, a força das águas e a capacidade de transporte são fatores naturais de um rio e contribuem para as modificações no seu curso. Segundo Binder (2002, p. 9) a capacidade de transporte determina o perfil longitudinal, o traçado do seu percurso e a seção transversal do rio. O material sólido transportado e o material constituinte do leito e das margens de um rio definem sua morfologia, que é fortemente influenciada pela vegetação existente.

As modificações físicas, que ocorrem ao longo do tempo, estão relacionadas à variação da vazão e promovem uma renovação contínua da morfologia típica do rio e das baixadas inundáveis. Tais aspectos são indicadores importantes do funcionamento do sistema ecológico de águas correntes. A dinâmica natural de um curso d'água sem alterações antrópicas significativas leva à formação de uma grande variedade de núcleos biológicos, estruturas e condições específicas que, em conjunto, determinam o ecossistema dos rios (BINDER, 2002, p. 9).

## **2.6 Influência da escala espaço-temporal na produção de sedimentos**

Os processos hidrológicos acontecem em diferentes tipos de escala, tanto espaciais como temporais. A integração destas escalas é um dos grandes problemas que os pesquisadores enfrentam hoje, isto porque os métodos e os resultados variam de acordo com a escala em que o processo será estudado (JIONGXIN & YUNXIA, 2005; DEPINÉ et al., 2011). Segundo Klemes (1983, p. 11) problemas relacionados à escala ocorrem, pois estamos acostumados a ver a escala apenas de maneira quantitativa, em que uma simples redução ou aumento de tamanho pode ser realizado sem critério. De Boer & Campbell (1989, p. 280) ressaltam que os problemas de mudanças de escala são peças fundamentais das

pesquisas em bacias hidrográficas. Essas mudanças de escala envolvem, normalmente, algum tipo de extrapolação ou a transferência de informação através de escalas (BLÖSCHL & SIVAPALAN, 1995, p. 261).

A interligação das escalas de espaço e de tempo tem uma importante função no desenvolvimento do conhecimento dos processos hidrológicos, entretanto esta relação é muitas vezes ignorada (KLEMES, 1983, p. 11).

### 2.6.1 Escala espacial

Tentativas de relacionar a produção de sedimentos com a área da bacia datam da metade do século XX (BRUNE, 1951 *apud* CARDOSO, 2013, p. 35). Em geral os estudos apresentam uma grande variabilidade nos resultados, sendo a relação entre produção de sedimento e área melhor definida quando consideradas regiões com similaridades fisiográficas (BIRKINSHAW & BATHURST, 2006, p. 752). Porém, apesar desse problema, a área vem sendo utilizada como um fator de controle na produção de sedimentos da bacia e comparada a outros trabalhos em todo o mundo.

Geralmente existe uma relação negativa entre produção de sedimentos específica e área da bacia, ou seja, quanto maior a área menor a produção de sedimentos (WALLING, 1983, p. 210; OWENS & SLAYMAKER, 1992, p. 150). Dendy & Bolton (1976) tiveram como objetivo avaliar o efeito da área e do escoamento superficial médio anual na produção de sedimentos em 800 reservatórios dos EUA. Eles encontraram que a produção de sedimento específico foi inversamente proporcional à potência de 0,16 da área de drenagem. A figura 5 mostra a tendência nas relações entre área e produção de sedimentos (suspensos e de leito) para alguns estudos.

Essa relação negativa entre produção de sedimentos e área da bacia pode ser justificado por alguns fatores: (i) pequenas bacias geralmente possuem uma declividade média maior, o que facilita o acontecimento dos processos erosivos; (ii), uma chuva simples pode cobrir toda uma bacia pequena, o que não acontece em bacias maiores; terceiro, com o aumento da bacia aumentam também as áreas com

planícies de inundação, facilitando a deposição dos sedimentos nestes locais (BUTZER, 1984, p. 293).

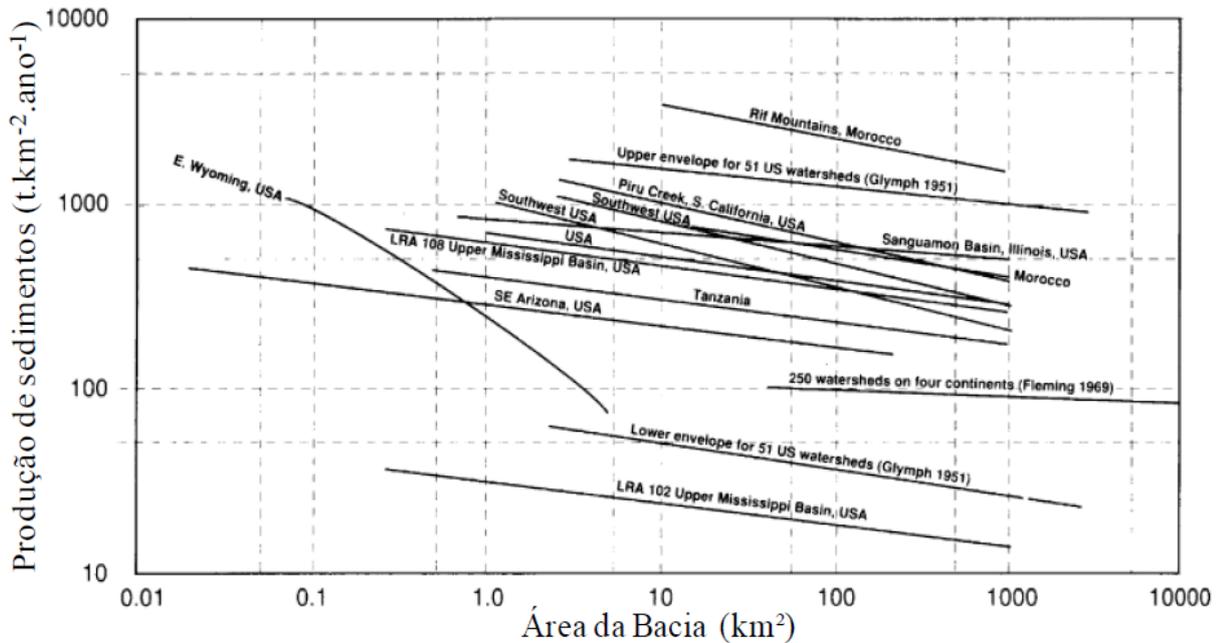


Figura 5. Relações entre produção de sedimento e área, com base em trabalhos de alguns países. Adaptado de Owens e Slaynaker (1992)

Correlações positivas entre área da bacia e produção de sedimentos também são encontradas. Poesen et al. (1996, p. 254) quantificaram alguns processos erosivos em uma região de área agrícola, as áreas variaram entre 0,002 e 0,100 km<sup>2</sup>. Esse estudo demonstrou que o aumento da área normalmente também implicava no aumento da produção de sedimentos em torno de 1200 t.km<sup>-2</sup>.ano<sup>-1</sup>. Birkinshaw & Bathurst (2006, p. 755) também acharam resultados semelhantes com o uso de um modelo distribuído SHETRAN. Esse fato ocorreu sempre que eram introduzidos no modelo usos de solo diferentes (floresta em altitudes maiores e plantações de trigo em altitudes menores, por exemplo) ou se o fornecimento de sedimento for principalmente proveniente da erosão do canal.

A falta de uma relação universal entre tais variáveis ressalta a dificuldade de entender os processos dependentes de escala nas bacias hidrográficas e a dificuldade em estimar a produção de sedimentos em diferentes escalas (CARDOSO, 2013, p. 37).

## 2.6.2 Escala temporal

Além da variação espacial, os eventos também variam temporalmente na bacia hidrográfica. Os processos hidrossedimentológicos variam em escalas de tempo a partir de segundos, horas, dias, meses e até anos (BLOSCHL & SIVAPALAN, 1995, p.; KUAI & TSAI, 2012, p. 248).

Por estarem diretamente relacionados com a precipitação, os processos hidrossedimentológicos são altamente dependentes da escala temporal. Isto porque esses fenômenos meteorológicos não acontecem de maneira constante ao longo do tempo. Assim, os processos hidrossedimentológicos serão também dependentes das variações temporais em que tais fenômenos acontecem, como estações do ano, por exemplo (CARDOSO, 2013, p. 40).

Kuai & Tsai (2012) mostraram o forte impacto das ondas de cheias sobre as variações de fluxo e de sedimentos em grandes escalas temporais, bem como o impacto da turbulência do fluxo em pequenas escalas temporais.

Hassan et al. (2010) analisaram quatro trechos do rio Yangtze, na China, entre 1956 e 2007, com o objetivo de encontrar as tendências na produção de sedimentos em suspensão e na perda de solo para cada trecho, assim como os efeitos da construção de uma barragem. Os autores encontraram diferentes ciclos temporais de troca de sedimentos, que chamaram de epiciclos, alguns maiores (15 a 40 anos) caracterizados pelo armazenamento de sedimentos finos, e outros menores (5 a 8 anos) normalmente associados a fluxo de sedimentos causados por grandes inundações.

Gao & Josefson (2012) estudaram as variações temporais do transporte de sedimentos em suspensão em uma bacia agrícola, com base em 3 anos de monitoramento. Concluíram que o transporte de sedimentos anual foi mais controlado pelas variações sazonais de uso e cobertura do solo do que pela alteração na vazão. Hassan et al. (2010) analisaram tendências de longos períodos no rio Yangtze, entre 1956 e 2007, demonstraram que anos com grandes enchentes determinaram os padrões temporais e espaciais de transporte de sedimentos nos anos subsequentes.

## 2.7 Variáveis de controle da produção de sedimentos em suspensão

O conhecimento da produção de sedimentos e dos fatores que controlam esse processo fornece informações valiosas para o desenvolvimento de modelos quantitativos da evolução de paisagens, geoquímicos e estudos de balanço de massa de sedimentos (RESTREPO, 2006, p. 214). Estudos sobre a produção de sedimentos para pequenas bacias também são muito importantes para estudar as ligações entre a erosão do solo e o transporte de sedimentos em suspensão em grandes rios (VERSTRAETEN & POESEN, 2001, p. 125).

Muitos autores observaram uma alta variabilidade na produção de sedimentos em suspensão para uma mesma área, de evento para evento (REGÜES et al, 2000;. LENZI & MARCHI, 2000; SUN et al, 2001.; SEEGER et al., 2004). Segundo Zabaleta et al (2007), essa variabilidade é a consequência das diferenças na forma ou nas proporções na qual os fatores físicos e antrópicos que controlam a produção e remoção dos sedimentos interagem em cada evento.

A disponibilidade dos sedimentos é fortemente relacionada com os diferentes usos do solo presentes nas bacias hidrográficas (ERSKINE et al, 2002, p. 275). Além disso, a análise da relação nos eventos entre a produção de sedimentos com as características da precipitação e da vazão podem ajudar na compreensão dos processos que atuam no transporte de sedimentos (ZABALETA et al, 2007). Assim pode-se esperar que a taxa da produção de sedimentos em suspensão altere em resposta as mudanças na precipitação (Old et al., 2003; Nearing, et al., 2005), incluindo a precipitação total e a intensidade da precipitação.

As relações entre a produção de sedimentos e as variáveis da vazão têm sido também amplamente analisadas (PICOUET et al., 2001; DUVERT et al, 2012). Seeger et al (2004) e Soler et al. (2008) estabeleceram que as condições antecedentes da bacia tais como umidade do solo ou chuvas antecedentes, apresentam uma importante influência com o fornecimento de sedimentos em suspensão.

Smith et al. (2003), concluíram que, parte da variação da produção de sedimentos em suspensão por evento, é devido a distribuição e intensidade da precipitação, além das condições de armazenamento de sedimento antecedente. Brasington & Richards (2000) estudaram a produção de sedimentos em suspensão

e a relação entre a  $C_{ss}$  e vazão e concluíram que, para determinados eventos, esta relação era muito influenciada pela intensidade da precipitação.

Alguns autores utilizando a vazão máxima como variável explicadora da produção de sedimentos em suspensão tiveram bons resultados. Restrepo et al (2006) explicaram 58% da variação da produção de sedimentos na bacia do rio Magdalena com o uso da vazão máxima e do escoamento superficial. Cardoso (2013) obteve coeficientes de determinação entre a  $P_{ss}$  e a vazão máxima de 0,80 a 0,94 para 3 pequenas bacias embutidas no município de Rio Negrinho/SC. Rankl (2004) relata que essa variação na produção de sedimentos em suspensão é resultado da alta variabilidade da intensidade da chuva e que a vazão de pico também irá depender da intensidade e do volume precipitado.

Duvert et al. (2012, p.48) dizem que a vazão máxima é uma variável significativa porque tem influencia nas funções de produção e transferência de sedimentos. Na produção, pois o escoamento superficial máximo é função da vazão máxima, e o escoamento superficial está diretamente relacionado com o desprendimento e transporte das partículas da encosta; e na transferência, pois a energia do fluxo na vazão máxima controla diretamente a capacidade de transporte, e o revolvimento do sedimento que estava depositado e a erosão das margens.

## **2.8 A Bacia do arroio Cadena**

A bacia já foi alvo de diversos estudos, principalmente voltados ao mapeamento de áreas de risco e à realização de diagnósticos da qualidade e fragilidade ambiental. Nesse sentido encontram-se os trabalhos de Berger (2001), Martins *et al.* (2005), Reis (2006) e Vaz (2009). Num estudo mais amplo, envolvendo toda a área urbana de Santa Maria, pode-se encontrar o trabalho de Alves *et al* (2011) que, a partir de técnicas de geoprocessamento, cruzaram mapas de uso e ocupação do solo, declividades do terreno e tipos de solo a fim de identificar as áreas mais suscetíveis a alagamentos. Cristo (2001) utilizou o índice de circularidade das sub-bacias (forma mais aproximada a um círculo) do Cadena para avaliar a suscetibilidade das diferentes áreas a enchentes.

Outros trabalhos abordaram sub-bacias do Cadena, a exemplo de Dotto (2006) que avaliou o balanço e a acumulação de sedimentos em duas ruas asfaltadas situadas no interior da bacia do arroio Cadena. Já Garcia (2005) avaliou a geração de escoamento superficial, com uso do SWMM, da bacia do arroio Cancela pertencente à bacia do arroio Cadena, e Scapin (2005) avaliou a produção de sedimentos na mesma bacia.

A bacia do arroio Cadena é predominantemente urbana e foi o berço da urbanização de Santa Maria, fator que contribuiu para a alteração considerável do fluxo natural de muitos de seus cursos d'água, havendo trechos canalizados e retificados, principalmente na sua porção montante.

Conforme aponta Oliveira (2004, p. 72), diversas intervenções foram realizadas nos cursos do arroio Cadena. Em 1968, o extinto Departamento de Obras e Saneamento (DNOS) iniciou a canalização de um dos afluentes do Cadena, sendo que hoje sobre essa obra se situa o parque Itaimbé. Em 1980 o leito da parcela mais ao sul foi retificado, sendo criado um novo trajeto para as águas. O leito antigo foi aterrado e deu lugar a loteamentos residenciais.

As sucessivas intervenções alteraram as condições de escoamento, acelerando o fluxo das águas, efeito que, associado à gradativa impermeabilização do solo causada pelas edificações, proporcionou o aumento da magnitude das enchentes e do poder de erosão das águas. O material oriundo da erosão das margens, quando alcança regiões de menor declividade, sedimenta assoreando parte do leito, formando bancos de areia, conforme ilustra a figura 6. Esse depósito eleva o fundo e alarga as margens, cenário propício para o agravamento de enchentes. Ainda é oportuna a citação de Oliveira *et al* (2006):

No entanto agravaram-se os problemas relacionados a erosão de margem, pois o aprofundamento do leito provocou a exposição do embasamento geológico, constituídos por material de textura argilo-arenoso e estrutura lamítica, com características mais resistentes e impermeáveis que o material das margens, de textura arenosa média a fina, não estruturada. Estas obras fizeram com que o escoamento das águas, principalmente nos períodos de cheia, provocassem a erosão lateral junto ao nível de escoamento, na zona de contato litológico, desencadeando desconfinamentos (também conhecidos por fenômeno de terras caídas) e escorregamento de margem.



Figura 6. Bancos de areia, com vegetação, causados pelo assoreamento do arroio Cadena.

Como a maioria das intervenções realizadas concentraram-se no alto e médio curso do Cadena, nas zonas mais nobres, as áreas à jusante ficaram potencialmente sujeitas ao risco de inundações, risco agravado pelo efeito de barramentos, tais como pontes e condutos mal dimensionados, ou que hoje estão nessa situação devido ao gradativo aumento na geração do escoamento superficial e devido aos resíduos sólidos que obstruem bueiros e tubos ao longo da cidade.

Visando corrigir a problemática da erosão, o trecho retificado na década de 80 (Figura 7) teve suas margens revestidas por pedras lascão, incluindo trechos com gabiões, conforme ilustra a figura 8. Atualmente, as obras realizadas pelo governo revestiram parte das margens do Cadena, e também asfaltaram as áreas marginais do arroio.



Figura 7. Cadena antes da proteção das margens. Fonte: Oliveira (2004).



Figura 8. Cadena após o revestimento das margens.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Área de Estudo

A área de estudo do presente trabalho é a porção da bacia hidrográfica do arroio Cadena com exutório na seção Irmã Dulce e em duas bacias embutidas a essa. Para esse estudo a bacia com exutório mais a jusante foi denominada de Irmã Dulce (ID), e as bacias embutidas de José Barin (JB) e Walter Jobim (WJ).

O local do estudo é situado na área urbana de Santa Maria, estado do Rio Grande do Sul, conforme ilustra a figura 9. De acordo com o Censo Demográfico 2010, Santa Maria conta com 261.027 habitantes (IBGE, 2010), com mais de 90% da população situada na zona urbana.

A área de estudo é caracterizada pela predominância de áreas impermeáveis (telhados, calçadas e ruas), a figura 10 ilustra o mapa de uso do solo para as bacias estudadas, e na tabela 2 são apresentados os valores percentuais de cada uso do solo. O clima da região é subtropical úmido, de acordo com a classificação de Köppen, caracterizado pela ocorrência de precipitações bem distribuídas ao longo dos 12 meses do ano, com totais anuais variando entre 1700 mm a 1800 mm. A temperatura oscila entre 30,4° Celsius no verão e 9,4° Celsius no inverno, com uma média ao longo do ano de 19,3° Celsius.

A bacia do arroio Cadena delimitada para esse estudo possui 26,39 km<sup>2</sup> de área, cujas elevações do terreno variam de 40 m até 440 m acima do nível do mar (Figura 11). O curso d'água principal possui uma extensão de 9,45 km, dos quais 660 m de galeria fechada em concreto armado iniciando na nascente, seguindo uma extensão de 2860 m com um canal aberto de alvenaria e segue até o exutório com canal aberto natural, desaguando no arroio Picadinha, afluente do rio Vacacaí (SILVA *et al.*, 2006, p. 2).

Conforme o mapa litológico elaborado por Michelon (2004), a área está assentada sobre as formações sedimentos atual, terraços fluviais, Serra Geral Botucatu, Caturrita, Santa Maria e Rosário do Sul. Silva *et al* (2006, p3) dizem que ampla área de planície de inundação possui uma formação com sedimentos aluviais

recentes, inconsolidados e saturados de água, considerada frágil do ponto de vista geológico para ocupação.

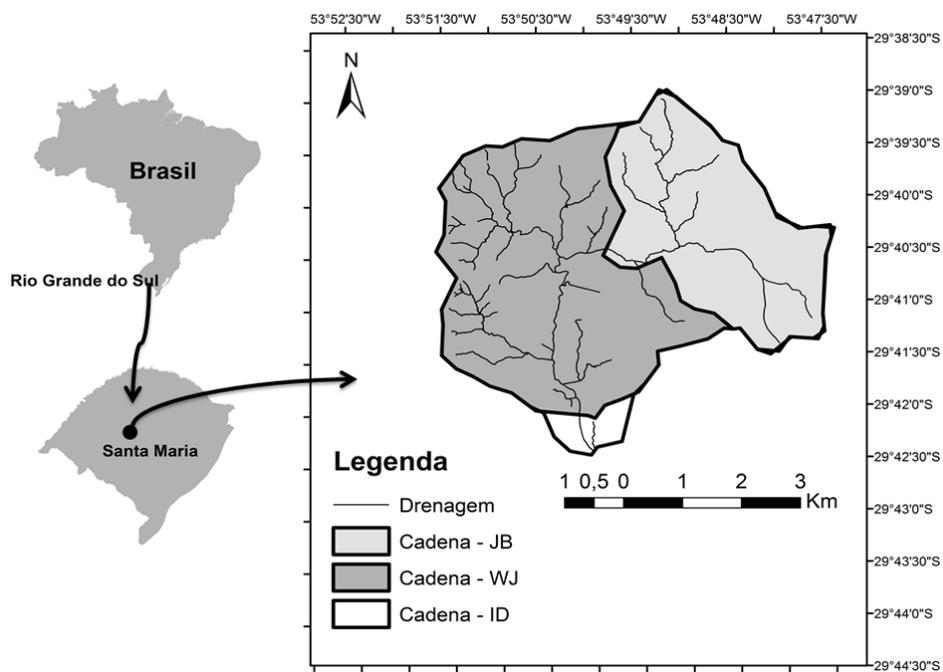


Figura 9. Área de estudo, a bacia do arroio Cadena.

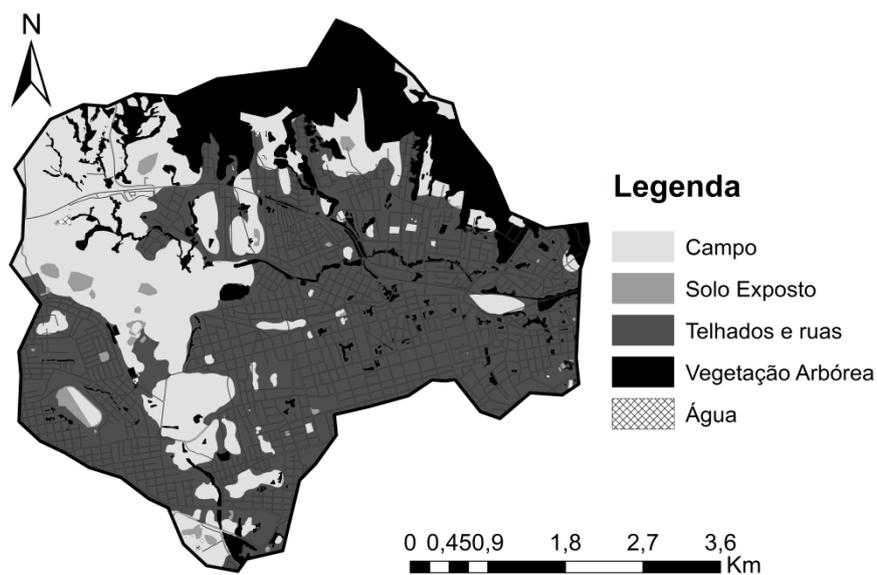


Figura 10. Uso e ocupação do solo, da bacia do arroio Cadena

Tabela 2. Percentuais de uso do solo para as bacias de estudo.

Bacia	Uso do solo (%)				
	Campo	Solo exposto	Telhados, calçadas e ruas	Vegetação arbórea	Água
Cadena – JB	6,09	0,18	72,75	20,95	0,03
Cadena – WJ	26,72	1,28	53,00	18,88	0,12
Cadena – ID	26,93	1,39	52,90	18,65	0,13

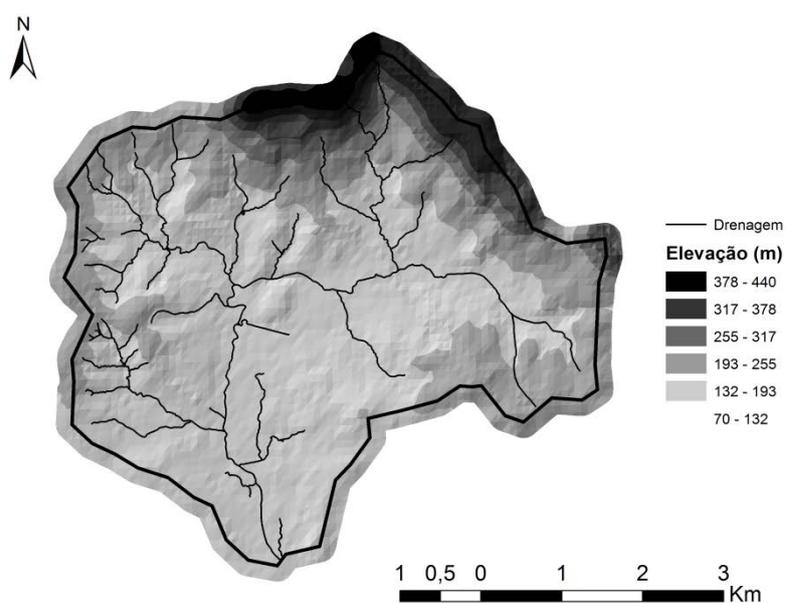


Figura 11. Modelo numérico do terreno da bacia do arroio Cadena.

## 3.2 Monitoramento hidrossedimentológico

O monitoramento hidrossedimentológico no arroio Cadena foi realizado no período entre maio de 2012 a dezembro de 2013, realizado por meio de leituras de precipitação e medições tradicionais de vazão e do transporte de sedimentos, conforme a seguir serão detalhadas

### 3.2.1 Dados pluviométricos

Para o acompanhamento das precipitações ocorridas na bacia foi operado um pluviógrafo, instalado na sede central da CORSAN no dia 27 de abril de 2012 pelo Grupo de Pesquisas em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (Ghidros), nas coordenadas 29°42'0,50"S e 53°50'8,20"O.

O equipamento instalado na bacia do arroio Cadena é um pluviógrafo eletrônico do tipo cubas basculante da marca HIDROMECC<sup>®</sup>, com área de captação de 400 cm<sup>2</sup>, permitindo monitorar a precipitação local em intervalos de tempo de 15 minutos (intervalo utilizado nesse estudo), com uma precisão de até 0,02mm (Figura 12).

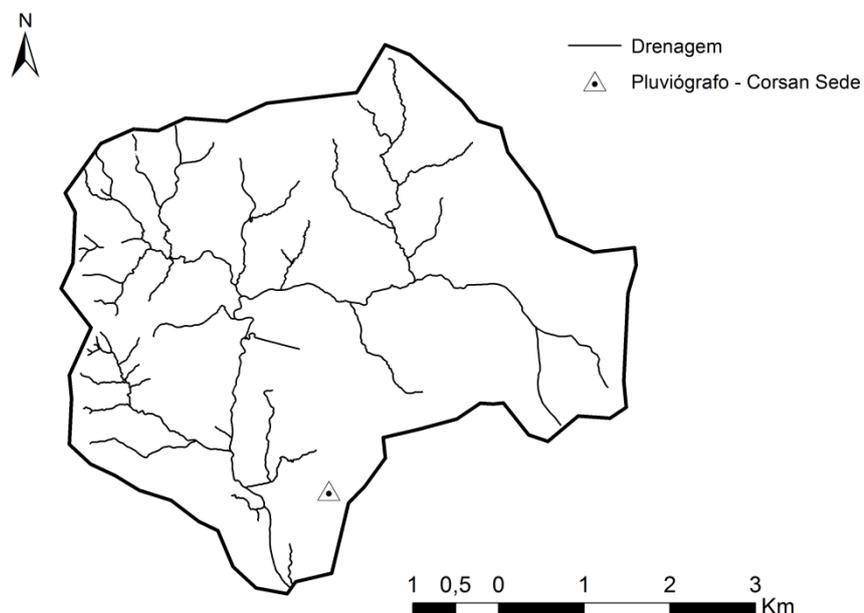


Figura 12. Pluviógrafo instalado na bacia do arroio Cadena

### 3.2.2 Seções hidrossedimentométricas

Os trabalhos de campo foram realizados em três seções transversais no arroio Cadena (Figura 13 e Tabela 3). A primeira seção foi denominada José Barin (JB), por se localizar na rua de mesmo nome no bairro Caturrita, onde não foram realizadas obras de intervenção no seu canal pelo poder público. A segunda seção

denominada de Walter Jobim (WJ) está localizada próximo ao centro da cidade, e situada em um ponto onde as margens do arroio foram revestidas com gabiões, e o seu leito foi retificado e revestido por com enrocamento de pedras como ilustra a figura 14.

A terceira seção denominada Irmã Dulce (ID), é a seção mais a jusante entre as estudadas e, assim como a JB, possui seu canal na forma natural, ou seja, não passou por intervenções realizadas pelo poder público na calha e nas margens do arroio.

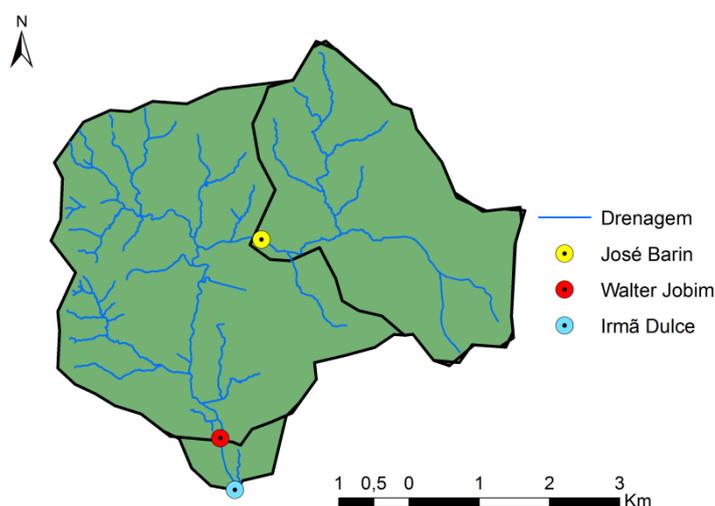


Figura 13. Seções hidrossedimentométricas, na bacia do arroio Cadena.



Figura 14. Enrocamento do leito no arroio Cadena.

Tabela 3 – Coordenadas geográficas das seções no arroio Cadena

Seção	Coordenadas	Área de contribuição (km <sup>2</sup> )	Largura média da seção (m)
JB	S 29°40'29" O 53°49'50"	10,06	3,50
WJ	S 29°42'72" O 53°50'80"	23,77	11,50
ID	S 29°42'24" O 53°49'57"	26,39	6,5

### 3.2.3 Dados Fluviométricos

Nas seções hidrossedimentométricas JB e ID foram instaladas régua linimétricas para que dados da altura da lâmina de água fossem levantados. Na seção Walter Jobim já existia uma régua linimétrica e um linígrafo eletrônico de bóia instalados.

### 3.2.4 Medidas de descarga líquida

As medições de vazão para a obtenção da curva chave foram realizadas em eventos de chuva, realizadas pelo método da meia secção, conforme descrito em DNAEE (1977).

As medições de velocidade para a obtenção da vazão foram obtidas por meio do Molinete Fluviométrico Universal operado com guincho hidrométrico, nas cheias, mostrado na figura 15a e micro molinete (Figura 15b), nas águas baixas. Por meio da batimetria na seção, pode-se determinar a área de escoamento e o perímetro molhado para cada evento de chuva.

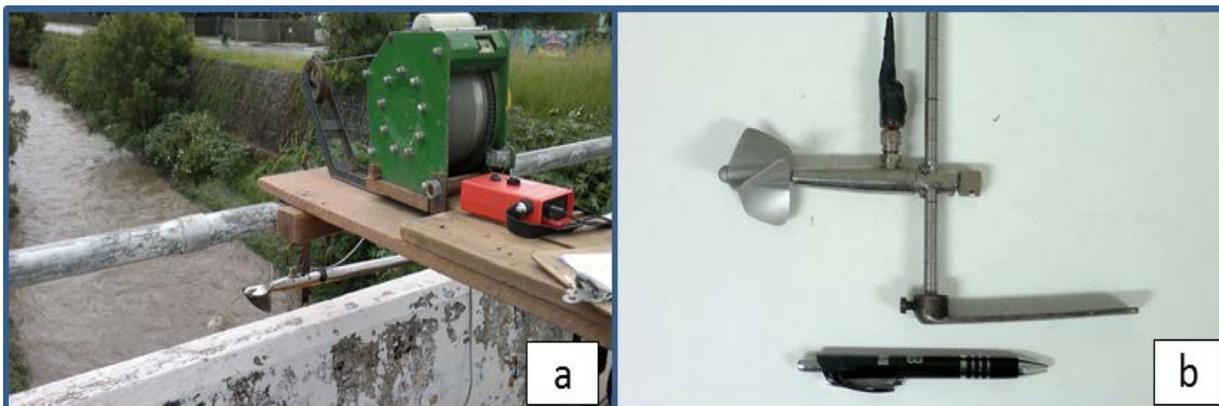


Figura 15. Molinetes fluviométricos. Molinete Universal OTT operado com Guincho Hidrométrico (a); micro molinete operado a vau (b).

### 3.2.5 Medidas de sedimentos em suspensão

As medidas de sedimentos em suspensão objetivaram a determinação da concentração de sedimentos em suspensão ( $C_{ss}$ ). Foi amostrado um ponto a cada evento nas três seções hidrossedimentométricas.

As amostragens da concentração de sedimentos em suspensão foram feitas com amostrador de sedimentos em suspensão AMS-3 utilizando guincho hidrométrico para médias e altas vazões como ilustra a figura 16a, e o amostrador AMS-1 (Figura 16b) operado a vau em baixas vazões. A utilização desses equipamentos para a obtenção de dados do transporte de sedimentos objetiva a coleta de amostras integradas na profundidade, conforme o método descrito a seguir.

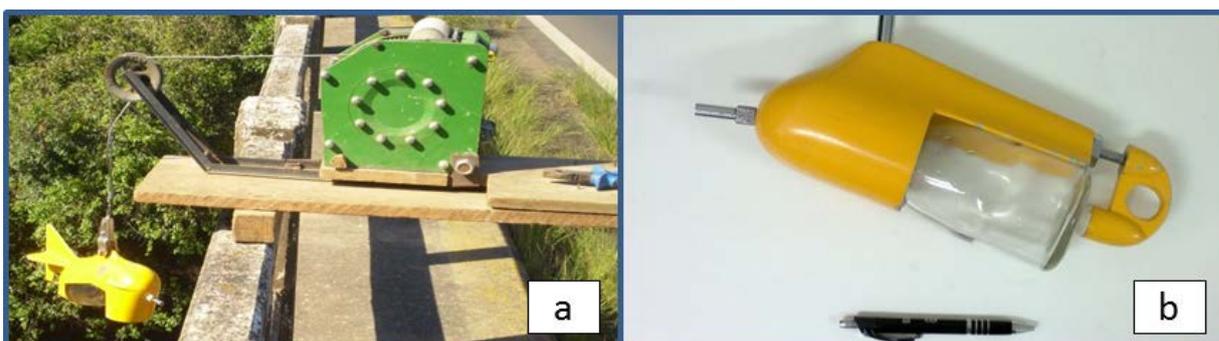


Figura 16. Amostradores de Sedimento em Suspensão. Amostrador AMS-3 com guincho hidrométrico (a); e amostrador AMS-1 (b).

Com o amostrador foram feitas coletas de sedimentos em suspensão em 3 verticais nas seções hidrossedimentométricas a  $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{2}$  e  $\frac{3}{4}$  da seção transversal. Segundo Carvalho (2008, p. 165) o método de três verticais é usado em medições diárias ou em pequenos rios, como no caso desse trabalho. Também se optou pela realização da amostragem em 3 verticais por causa da subida da onda da cheia, que se dá de forma rápida no arroio Cadena, dificultando e inviabilizando a coleta em mais verticais.

Os amostradores são construídos de alumínio com corpo de forma hidrodinâmica, são constituídos por uma haste para realizar a coleta a vau (AMS-1), ou suporte para conexão com o cabo do guincho hidrométrico (AMS-3). Possuem um bocal para a coleta do material e no seu interior é colocada uma garrafa com capacidade de 500ml. A amostragem é feita com o enchimento de aproximadamente dois terços da garrafa, o qual ocorre durante a movimentação vertical do amostrador em velocidade de trânsito constante entre a superfície e um ponto poucos centímetros acima do leito. Segundo Carvalho (2008, p. 165), esse procedimento é conhecido como IVT, Igual Velocidade de Trânsito (do inglês, ETR, equal transit rate). Normalmente, o amostrador não deve tocar o leito para não correr o risco de coletar sedimento de arrasto, e também para que a velocidade de entrada da amostra seja igual ou quase igual à velocidade instantânea da corrente. É necessário que o bico fique na horizontal, isto é, o amostrador deve se movimentar sem haver inclinação. Os bicos utilizados foram de 1/8", 3/16" e 1/4", a escolha para o adequado uso no devido tempo de trânsito é feita de acordo com a velocidade média no trecho.

Não foram realizadas medições do sedimento de arraste de fundo por causa da característica do arroio. Na seção Walter Jobim o leito foi enrocado, situação que não permitiria que o amostrador ficasse na posição adequada.

### **3.3 Análises de laboratório**

As análises de laboratório utilizadas nesse trabalho compreenderam a determinação da concentração de sedimentos em suspensão e teor de matéria orgânica (MO) no sedimento em suspensão.

Os métodos usados nas análises sedimentométricas são indicados no esquema apresentado na figura 17 (DNAEE, 2000).

Sedimentos em suspensão	Análise de concentração total	Filtração Evaporação Tubo de Retirada pelo Fundo
	Análise granulométrica	Tubo de Retirada pelo Fundo Pipetagem Densímetro
Sedimentos do leito	Análise granulométrica	Peneiramento Densímetro Pipetagem Tubo de acumulação visual Tubo de retirada pelo fundo

Figura 17. Métodos de análise comumente utilizados. Fonte: DNAEE (2000).

Neste trabalho a determinação da concentração de sedimentos em suspensão foi feita pelo método da filtração (para concentrações inferiores a 200 mg.l<sup>-1</sup>) e pelo método da evaporação (para concentrações superiores a 200 mg.l<sup>-1</sup>) de acordo com o recomendado por DNAEE (2000) e Carvalho (2008).

### 3.3.1 Ensaio de filtração

Esse método foi escolhido para a maioria dos ensaios, pois as amostras apresentavam lodo no fundo do recipiente após um período de 24 horas de decantação. Também esse método foi tido como prioritário nos ensaios por fornecer dados do teor de matéria orgânica (MO), parâmetro analisado nesse estudo.

Tendo conhecimento desse comportamento as amostras passaram pelo processo de filtração no instante em que chegavam do campo. O ensaio foi realizado sempre com a totalidade da amostra, em virtude do processo de redução

não poder ser realizado, pois necessitaria de um período mínimo de 24 horas para isso. O ensaio é descrito a seguir.

Para a execução do processo, o conjunto cápsula + filtro (C+F) é colocado na estufa a 105°C, por 2 horas, para total secagem dos materiais. Posteriormente leva-se o conjunto C+F para o dessecador por cerca de 30 min para seu resfriamento, após é realizada a pesagem do conjunto C+F em balança de precisão. Após a amostra proveniente da coleta é acondicionada em proveta graduada, para se obter o total em litros.

Com o auxílio de uma pinça metálica acondiciona-se a membrana filtrante no cadinho de Gooch e este no kitasato. Então, se agita a amostra até obter uma homogeneização perfeita e despeja-se um pouco da amostra no cadinho, deve-se ligar a bomba de vácuo filtrando a amostra com uma pressão de 10 a 20 pol Hg. Filtra-se toda a amostra limpando o remanescente ainda existente no recipiente com água destilada até ficar sem qualquer resíduo de sedimento. A figura 18 ilustra os equipamentos e materiais utilizados no método.

Após a filtração, com uma pinça metálica transfere-se o filtro do cadinho de Gooch para a cápsula numerada; levando-a para secar na estufa a 105°C por 24 horas. Em seguida retirasse as cápsulas da estufa levando-as para o dessecador até que atinjam temperatura ambiente. Pesa-se o conjunto cápsula + filtro + sedimento em balança eletrônica digital, anotando em planilha o valor obtido. Com o objetivo de queimar a matéria orgânica, a cápsula com o material é levada ao forno mufla, por um período de 15 minutos com temperatura e 505°C. O conjunto é novamente levado ao dessecador, e então pesado novamente.

Na primeira pesagem se obtêm os sólidos totais, na segunda a concentração de sedimentos em suspensão. Pela diferença entre as duas pesagens é possível obter o teor de matéria orgânica nas amostras.

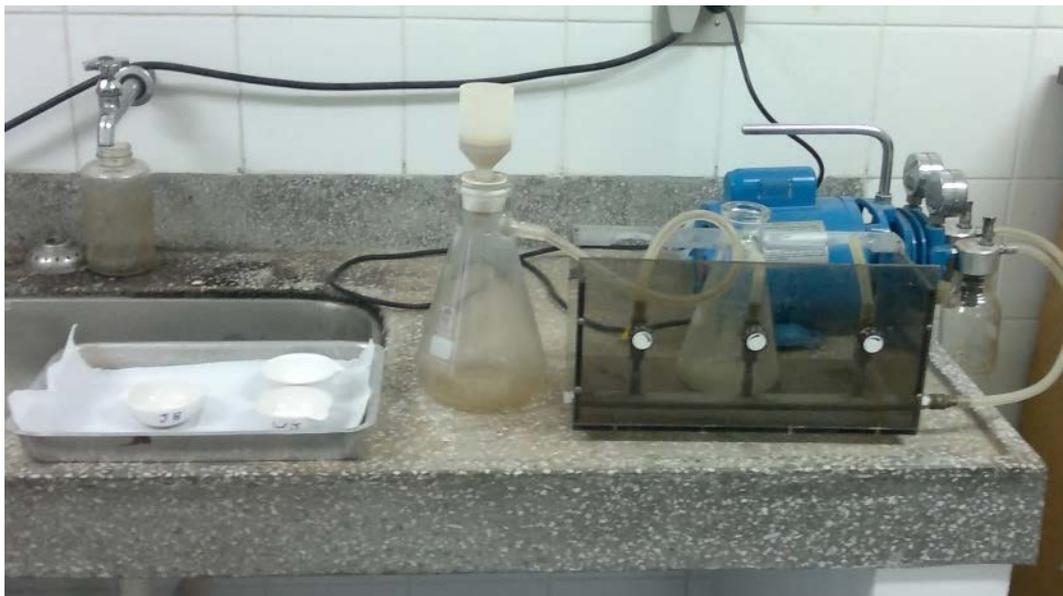


Figura 18. Equipamentos e materiais utilizados no método da filtração.

### 3.3.2 Ensaio de evaporação

O ensaio da evaporação foi utilizado em situações em que as amostras apresentavam grande quantidade de sedimentos em suspensão, assim evitando que houvesse a colmatção do filtro e por consequência o comprometimento da análise, e em situações em que se observava a ausência de quantidade significativa de material orgânico na amostra.

O procedimento inicia-se com a amostra recolhida a campo sendo colocada em repouso, para decantação por 24 horas, em um recipiente de 1000 ml. Após a decantação, são retiradas duas porções de 50 ml cada do material sobrenadante (isenta de sedimentos) com auxílio de uma pipeta volumétrica, transferindo esse volume para dois béqueres de 50 ml com peso conhecido. Em seguida os béqueres são levados à estufa por 24 horas e após a evaporação total da amostra são levados ao dessecador até que atinjam a temperatura ambiente, para em seguida serem pesados.

Após a primeira etapa, a mesma amostra utilizada anteriormente foi reduzida a porção decantada com auxílio de uma mangueira ao volume menor de 100 ml. O material remanescente foi transferido a uma proveta graduada anotando-se o volume transferido. Com o volume conhecido, transfere-se a um béquer de 250 ml e

leva-se a estufa (24 horas). Após esse período, o béquer era levado ao dessecador e posteriormente pesado. Com a divisão do volume coletado pelo peso seco obtido, foi encontrada a concentração total para as amostras coletadas.

A planilha utilizada para determinação da concentração em  $\text{mg.l}^{-1}$  é apresentada no Anexo A.

### 3.4 Cálculo da descarga sólida em suspensão ( $Q_s$ )

Após executadas as etapas anteriores, medições e análises de laboratório, os dados que objetivam o cálculo da descarga sólida estão prontos para serem inseridos nas equações, visando estabelecer valores para esses parâmetros. As medições da descarga sólida em suspensão tem uma única análise a partir de uma amostra composta. A concentração corresponde ao valor médio na seção, sendo a descarga sólida em suspensão calculada pela equação 1 (GORDON, 2004, p. 198).

$$Q_s = 0,0864.Q.C_{ss} \quad (1)$$

Onde  $Q$  é a descarga líquida em  $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ ;  $C_{ss}$  a concentração de sedimentos em suspensão em  $\text{mg.l}^{-1}$  ou ppm,  $0,0864$  é um fator de conversão, que converte segundos para dia, e miligramas por litro para toneladas por metro cúbico; e  $Q_s$  é dado em  $\text{ton.dia}^{-1}$

### 3.5 Cálculo da produção específica de sedimentos em suspensão ( $P_{ss}$ )

A produção específica de sedimentos em suspensão é a relação entre a  $Q_s$  média de um dado período de tempo e a área de drenagem da bacia hidrográfica. A equação 2 apresenta essa fórmula utilizada para a determinação da  $P_{ss}$  nas escalas de tempo de dia, mês e ano.

$$P_{ss} = Q_s/A \quad (2)$$

Onde  $Q_s$  é a Descarga sólida em suspensão ( $t.dia^{-1}$ ),  $A$  é a área de drenagem da bacia ( $km^2$ ) e  $P_{ss}$  é dado em  $t.km^{-2}.dia^{-1}$ .

### 3.6 Cálculo da curva chave da vazão líquida

A curva chave da vazão líquida relaciona a altura da lâmina de água de um rio com a sua vazão. Para obter a vazão, fazem-se medições do nível d'água e correlaciona-se com a curva-chave do canal.

Para diversos níveis são realizadas as medições de vazão e obtidos pares cota-vazão. A relação é obtida a partir da interpolação destes pontos. A curva cota-vazão tem uma relação biunívoca, ou seja, relação que associa cada valor de cota a um único valor de vazão e vice-versa (PAIVA *et al*, 2011, p. 3). A relação Vazão x Cota foi aproximada na forma da equação 3.

$$Q = a.(H - H_0)^b \quad (3)$$

Onde:  $Q$  é a vazão líquida,  $H$  é a cota do rio, e  $a$ ,  $b$  e  $H_0$  são parâmetros de ajuste.

Os parâmetros de ajuste são determinados por tentativa e erro, e nesse trabalho foi utilizado à ferramenta *Solver* do Excel 2010 para a determinação dessas constantes.

### 3.7 Cálculo da curva chave de sedimentos

Uma vez determinados os valores de concentração de sedimentos em suspensão ( $C_{ss}$ ) de cada medição, foi traçada a curva chave de sedimentos, correlacionando a  $C_{ss}$  com a vazão na seguinte forma:

$$C_{ss} = a.Q^b \quad (4)$$

onde:  $C_{ss}$  é expressa em  $mg.l^{-1}$ ,  $Q$  é a vazão líquida em  $m^3.s^{-1}$ ,  $a$  e  $b$  são valores adimensionais de ajuste.

Os parâmetros de ajuste foram determinados pela ferramenta *solver* do Excel 2010, utilizando o método dos mínimos quadrados.

### 3.8 Variáveis de controle da $C_{ss}$ em eventos

Para a determinação das variáveis de controle da  $C_{ss}$ , foram realizadas as seguintes etapas:

#### 3.8.1 Identificação e delimitação dos eventos

Nesse estudo, o termo “evento” é utilizado como sinônimo de um evento hidrossedimentológico que abrange a precipitação e a ascensão e o decréscimo do hidrograma. Foram selecionados 17 eventos em que foram realizadas medições da  $C_{ss}$ . Essas medições abrangeram um ponto na escala de tempo, durante os hidrogramas dos eventos.

O processo de delimitação, que foi realizada com base no comportamento da precipitação, e do hidrograma seguiu a metodologia aplicada por Cardoso (2013). A delimitação foi utilizada para o cálculo das variáveis de cada evento e, sua delimitação inicial, foi feita de duas formas: uma para as variáveis relacionadas à precipitação e outra para as variáveis de vazão.

- Precipitação: A delimitação para o início dos eventos para as variáveis relacionadas à precipitação foi realizada a partir do início da chuva que gerou esses eventos. Para delimitação do término dos eventos foi considerado o limite de uma hora sem chuva (Figura 19).

- Vazão: A delimitação para o início dos eventos relacionados à Vazão foi realizada a partir do momento em que a vazão começou a subir, isto é, assim que a variável registrou aumento nos seus valores. De acordo com Cardoso (2013) nessa delimitação o tempo entre o início da precipitação e a elevação da vazão não é levado em consideração, porque se assume que a quantidade de sedimento transportado nesse período não é resultante da precipitação do evento e sim das condições anteriores da bacia. O término desse evento foi considerado quando o valor da vazão chegou a um valor próximo ao que estava imediatamente antes do início de sua ascensão (Figura 19). Como a bacia é urbana com uma alta taxa de impermeabilização a vazão levava poucas horas para voltar a sua condição pré-evento.

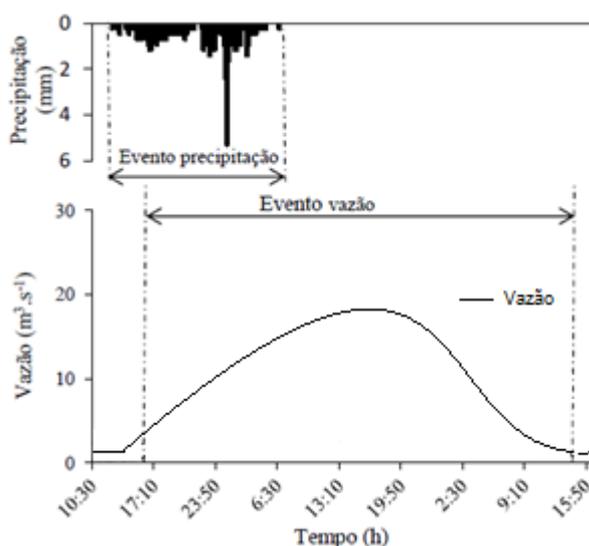


Figura 19. Delimitação dos eventos.

Fonte: Adaptado de Cardoso (2013).

### 3.8.2 Descrição e cálculo das variáveis selecionadas

Foram selecionadas variáveis que pudessem ter correlação com a  $C_{ss}$  medida no evento. Além de variáveis durante o evento, foram selecionados variáveis antecedentes para verificar possíveis influências das condições anteriores da bacia

com a C<sub>ss</sub> medida pontualmente. Os fatores selecionados estão relacionados com dados de vazão e precipitação e estão apresentados na tabela 4.

O Índice de precipitação antecedente (API) foi calculado considerando sempre a medição imediatamente anterior ao início da chuva do evento, utilizando a equação (5) conforme sugerido por Linsley & Kohler (1951) e Mota (2012). O ponto de partida para o cálculo de API foi imediatamente anterior ao começo da chuva que caracterizou o evento selecionado.

$$API_i = b_1.P_1 + b_2.P_2 + b_3.P_3 + \dots + b_i.P_i \quad (5)$$

Onde:  $P_i$  é o acumulado de chuva que ocorreu no *i-ésimo* período anterior à chuva do evento em questão, em mm; e  $b_i$  é uma constante calculada como  $b_i = 1/i$ .

A taxa de incremento de vazão ( $TiQ$ ) é um outro índice que foi utilizado nesse trabalho, e foi calculado utilizando a equação 6.

$$TiQ = \frac{(Q_{max} - Q_i)}{t_{pico}} \quad (6)$$

Onde:  $TiQ$  é a taxa de incremento de vazão ( $m^3.s^{-1}.h^{-1}$ ),  $Q_{max}$  é a vazão máxima do evento ( $m^3.s^{-1}$ ),  $Q_i$  é a vazão inicial ( $m^3.s^{-1}$ ) e  $t_{pico}$  é o tempo decorrido entre o início do evento e a vazão máxima do evento (h).

Segundo Cardoso (2013, p. 45), este fator permite levar em consideração a taxa de aumento da vazão. Assim, duas outras características são integradas. A primeira é a intensidade da precipitação, pois quanto mais intensa a precipitação maior a taxa de aumento da vazão, sendo que a precipitação está diretamente ligada à ocorrência dos processos erosivos. A segunda é a capacidade de transporte, pois geralmente quanto maior a taxa de aumento da vazão maior a capacidade de transporte de sedimento e de remobilização de sedimento de fundo.

Outra variável utilizada nesse estudo é o escoamento superficial. As separações dos valores do escoamento superficial nos eventos foram obtidas por

análise gráfica dos hidrogramas, pelo método da declividade constante conforme descrito por Ven Te Chow (1964).

Tabela 4 – Variáveis utilizadas no estudo

	Variável	Símbolo	Definição	Unidade
Pré-evento	Vazão antecedente	Qa	Última vazão registrada pelo linigrafo antes do início do evento	$m^3 \cdot s^{-1}$
	Vazão antecedente de 1 Dia	Qa1	Média da vazão das 24h anteriores ao evento.	$m^3 \cdot s^{-1}$
	Índice de precipitação antecedente de 5 dias	API <sub>5</sub>	Índice da chuva dos 5 dias anteriores, a partir do início da chuva que deu origem ao evento.	mm
	Índice de precipitação antecedente de 3 dias	API <sub>3</sub>	Índice da chuva dos 3 dias anteriores, a partir do início da chuva que deu origem ao evento.	mm
	Índice de precipitação antecedente de 1 dia	API <sub>1</sub>	Índice da chuva de 1 dia anterior, a partir do início da chuva que deu origem ao evento.	mm
Evento	Precipitação total	Pt	Precipitação total acumulada do evento de precipitação.	mm
	Tempo de pico	t <sub>pico</sub>	Tempo entre o início e o pico (máxima) das vazões do evento.	h
	Índice de precipitação	IP	Quantidade de chuva acumulada entre o início da precipitação e o pico de vazão.	mm
	Taxa de incremento de vazão	TiQ	Varição que a vazão teve entre o início e o pico do evento dividido pelo tempo entre início e o pico da vazão.	$m^3 \cdot s^{-1} \cdot h^{-1}$
	Escoamento superficial	Q <sub>sup</sub>	Escoamento superficial durante o evento.	mm
	Vazão máxima	Q <sub>máx</sub>	Vazão máxima do evento.	$m^3 \cdot s^{-1}$
	Vazão média	Q <sub>med</sub>	Vazão média de todo o evento.	$m^3 \cdot s^{-1}$
	Concentração de Sedimentos em suspensão.	C <sub>SS<sub>medida</sub></sub>	Concentração de sedimentos em suspensão medida em algum momento do evento.	mg.l <sup>-1</sup>

### 3.8.3 Tratamento estatístico

Após a organização dos dados foram realizadas análises de correlação entre as variáveis de controle e a C<sub>SS<sub>medida</sub></sub>, a fim de se verificar quais variáveis

apresentam maior influência no transporte de sedimentos na bacia em estudo. Na análise de correlação foi utilizado o coeficiente de correlação linear de Person ( $r^2$ ) gerado com o uso do *software SPSS Statistics 17.0*.

Segundo UWE (2012), Florence *et al* (2012) e Kim *et al* (2007), o coeficiente de correlação de Pearson indica o grau de intensidade da correlação entre duas variáveis e, ainda, o sentido dessa correlação. Varia de +1 (correlação perfeita positiva) a -1 (correlação perfeita negativa), sendo também adimensional (NAGHETTINI & PINTO, 2007).

Além disso, as unidades adotadas não afetam o valor do coeficiente de correlação, e sim evidenciam a força de associação entre as variáveis (UWE, 2012).

Crespo (2005) estabelece limites entre os índices de correlação tais como:

$0,6 \leq r^2 \leq 1$ , correlações significativas entre as variáveis analisadas;

$0,3 \leq r^2 < 0,6$ , há uma correlação relativamente fraca entre as variáveis;

e se  $0 < r^2 < 0,3$ , a correlação é muito fraca e, praticamente, nada se pode concluir sobre a relação entre as variáveis em estudo.

Um valor do coeficiente de correlação elevado, embora estatisticamente significativo, não implica necessariamente numa relação de causa e efeito, mas a tendência que as variáveis apresentam quanto à sua variação conjunta (NAGHETTINI & PINTO, 2007, p.359).

#### 3.8.4 Análise de regressão

Depois da seleção das variáveis independentes (as duas variáveis que apresentaram melhor  $r^2$  com a  $Css_{medida}$ ) foi novamente utilizado o *software SPSS Statistics 17.0* para consolidar os parâmetros e gerar um modelo de regressão linear. O programa aplica o método dos mínimos quadrados que busca descrever a reta que passa o mais próximo possível dos pontos observados. O objetivo do método dos mínimos quadrados é encontrar a função de regressão que minimize a soma das distâncias entre a função ajustada e os pontos observados

A validação dos modelos de regressão gerados levou em consideração a análise residual. Essa análise consiste em técnicas utilizadas para investigar a adequabilidade de um modelo de regressão com base nos resíduos.

A análise dos resíduos é feita para a variável dependente e permite verificar se o modelo ajustado é adequado para os dados, se as variâncias são homogêneas, se existem valores discrepantes e se os erros podem ser assumidos como tendo aproximadamente uma distribuição normal. Os resíduos consistem da diferença entre os valores observados e os estimados pelo modelo ajustado.

### **3.9 Organização dos resultados**

Os resultados dos métodos empregados e descritos na metodologia foram organizados de forma a corresponder aos objetivos do estudo, ou seja, para atender às necessidades das análises espacial e temporal dos processos hidrossedimentológicos. Para um melhor entendimento do capítulo 4 será aqui então relatado a forma com que os dados (precipitação, descarga líquida, C<sub>ss</sub>, MO, e P<sub>ss</sub>) foram arranjados para cada tipo de análise (espacial e temporal).

#### **3.9.1 Análise espacial**

Na análise espacial foram discutidos os resultados de 13 medições em conjunto nas três seções hidrossedimentométricas (JB, WJ e ID), caracterizando a sedimentologia do arroio Cadena. Essas medidas foram de descarga líquida, C<sub>ss</sub> e teor de matéria orgânica. As análises laboratoriais de sedimentos foram realizadas exclusivamente pelo método da filtração, para diferenciar as frações de sedimentos e matéria orgânica na carga suspensa.

#### **3.9.2 Análise temporal**

Na análise temporal quanto aos dados de descarga líquida e C<sub>ss</sub> foram utilizados dados medidos exclusivamente na seção WJ, onde se tinha disponível um

linígrafo eletrônico conforme já detalhado. Também foram analisados os dados registrados de precipitação.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesse capítulo são discutidos os resultados obtidos pela aplicação da metodologia proposta, durante o desenvolvimento da pesquisa. São apresentados os seguintes aspectos:

- i. Caracterização espacial das características sedimentológicas;
- ii. Variação temporal das características hidrológicas;
- iii. Transporte de sedimentos em suspensão no período de 04/2012 – 02/2014 e;
- iv. Variáveis de controle da Css em eventos.

### 4.1 Caracterização espacial das características sedimentológicas do arroio Cadena

#### 4.1.1 Caracterização espacial da vazão líquida

Na tabela 5 estão dispostos os valores medidos durante o monitoramento da descarga líquida no período estudado, para as seções de medição José Barin (JB), Walter Jobim (WJ) e Irmã Dulce (ID). Em geral as vazões apresentaram menores valores na seção JB, devido a essa se localizar mais a montante no arroio Cadena, e por consequência ter uma menor área de contribuição do escoamento superficial, em relação aos demais locais amostrados. Nessa seção não foi possível realizar medições em eventos de alta pluviosidade, pois a ponte (Figura 20) existente no local não apresentava condições de segurança para o apoio do guincho hidrométrico, e também por ser utilizada como frequente meio de travessia pelos moradores da região, impossibilitando as duas atividades conjuntas. Portanto só foram registrados dados em situações que a medição a vau era possível.

Analisando os dados da tabela 5 observa-se que os eventos 1, 2, 4, 5 e 9 tiveram maiores vazões na seção WJ do que na seção ID. Por visitas de campo descarta-se a ideia de que entre as seções WJ e ID ocorra o bombeamento ou

retirada d'água para qualquer fim. Acredita-se então na hipótese de que em períodos de médias ou baixas vazões possam estar se formando reservatórios temporários no canal, que armazenam água e sedimentos nesses períodos. Essa desvio nos dados também pode ser em decorrência de que as medições não foram realizadas no mesmo instante, ou seja, entre a medição de um ponto e outro pode ter ocorrido um acréscimo de vazão da bacia para o canal. Por fim essa variação nos dados entre as seções WJ e ID também pode ser atribuída ao erro assumido na medição da vazão.

Tabela 5 – Valores medidos de descarga líquida em 3 seções transversais no arroio Cadena

Evento	José Barín		Walter Jobim		Irmã Dulce	
	Vazão (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )	Vel. Média (m.s <sup>-1</sup> )	Vazão (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )	Vel. Média (m.s <sup>-1</sup> )	Vazão (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )	Vel. Média (m.s <sup>-1</sup> )
1	0,1557	0,167	0,3422	0,315	0,2942	0,195
2	0,1659	0,229	0,6201	0,383	0,3624	0,228
3	0,3048	0,293	1,1578	0,500	1,1953	0,367
4	0,2104	0,172	0,5822	0,379	0,3126	0,210
5	0,1283	0,124	0,3495	0,301	0,2788	0,172
6	0,1472	0,143	0,3630	0,260	0,3689	0,225
7	-	-	2,7895	0,685	2,8575	0,608
8	0,1541	0,155	0,4534	0,287	0,5015	0,275
9	0,1385	0,133	0,4194	0,287	0,3606	0,232
10	0,1447	0,152	0,4987	0,319	0,5262	0,279
11	0,2649	0,248	0,7399	0,422	0,7485	0,350
12	0,5018	0,239	1,5368	0,493	2,6309	0,450
13	-	-	0,9666	0,386	2,9408	0,481



Figura 20. Ponte sobre a seção José Barin, no arroio Cadena.

Na tabela 6 a variação das vazões é expressa em porcentagens. É possível analisar que o acréscimo de vazão da seção JB para a WJ foi sempre igual ou superior a 120%. Nos eventos de alta pluviosidade esses resultados são naturalmente explicados, pois na seção JB a área de contribuição é menor, conforme mencionado no início desse capítulo. Porém esse acréscimo de vazão pode ter contribuição do sistema de drenagem, pois além das águas pluviais, são lançados também nos córregos da cidade esgoto não tratado (Oliveira, 2006), que uma vez diluídos no meio se incorporam as características hídricas do córrego.

Tabela 6 – Variação em % das vazões entre as seções transversais estudadas

Evento	Acréscimo das vazões	
	JB para WJ	WJ para ID
	-----%-----	
1	120	-14
2	274	-42
3	280	3
4	177	-46
5	172	-20
6	147	2

Evento	JB para WJ	WJ para ID
7	-	2
8	194	11
9	203	-14
10	245	6
11	179	1
12	206	71
13	-	204

#### 4.1.2 Caracterização espacial do transporte de sedimentos

A distribuição espacial do transporte dos sedimentos no arroio Cadena foi analisada por meio das medições sedimentológicas obtidas nas campanhas de amostragem. Na tabela 7 são apresentados os valores de concentração de sedimentos em suspensão e vazão sólida. Observa-se que nos eventos 9 e 13 não constam os dados das variáveis estudadas. Isso ocorreu por causa da grande quantidade de esgoto e matéria orgânica presente nas amostras, como ilustra a figura 21 que mostra a tentativa de análise de uma dessas amostras. A carga de material orgânico presente nessas amostras foi tanta, que o filtro utilizado para a análise da C<sub>ss</sub> colmatou nos primeiros instantes do processo.



Figura 21. Tentativa de análise de filtração.

Tabela 7 – Concentração de sedimentos em suspensão (Css) e Vazão sólida (Qs) determinadas no período de estudo

Evento	José Barín		Walter Jobim		Irmã Dulce	
	Css (mg.l <sup>-1</sup> )	Qs (Ton.d <sup>-1</sup> )	Css (mg.l <sup>-1</sup> )	Qs (Ton.d <sup>-1</sup> )	Css (mg.l <sup>-1</sup> )	Qs (Ton.d <sup>-1</sup> )
1	0,8051	0,0108	2,8000	0,0828	4,8433	0,1231
2	0,9009	0,0129	16,0237	0,8525	18,8966	0,5917
3	9,4798	0,2496	23,3166	2,3324	21,3174	2,0173
4	6,5430	0,1189	11,5308	0,5800	13,1613	0,3555
5	7,3617	0,0816	9,3000	0,2808	10,4118	0,2508
6	8,4416	0,1074	6,7114	0,2105	9,4366	0,3008
7	-	-	49,6970	11,9776	51,7160	12,7681
8	7,9730	0,1062	26,5385	1,0396	35,0549	1,5189
9	-	-	-	-	-	-
10	9,6154	0,1202	15,0000	0,6463	15,0838	0,6858
11	16,5116	0,3779	25,3750	1,6222	27,4324	1,7741
12	16,000	0,6937	35,000	4,6473	60,5600	13,7659
13	-	-	-	-	-	-

Na análise pelo diagrama de caixa, conforme é apresentado na figura 22, pode-se visualizar que há uma maior variação dos valores na seção ID, que também possui maior média. Também é possível constatar que o incremento da taxa de sedimentos no canal é maior da seção JB para a WJ, do que da seção WJ para a ID, situação que fica mais evidente quando analisada a tabela 8 onde é apresentada a variação em porcentagem da Css ao longo do canal.

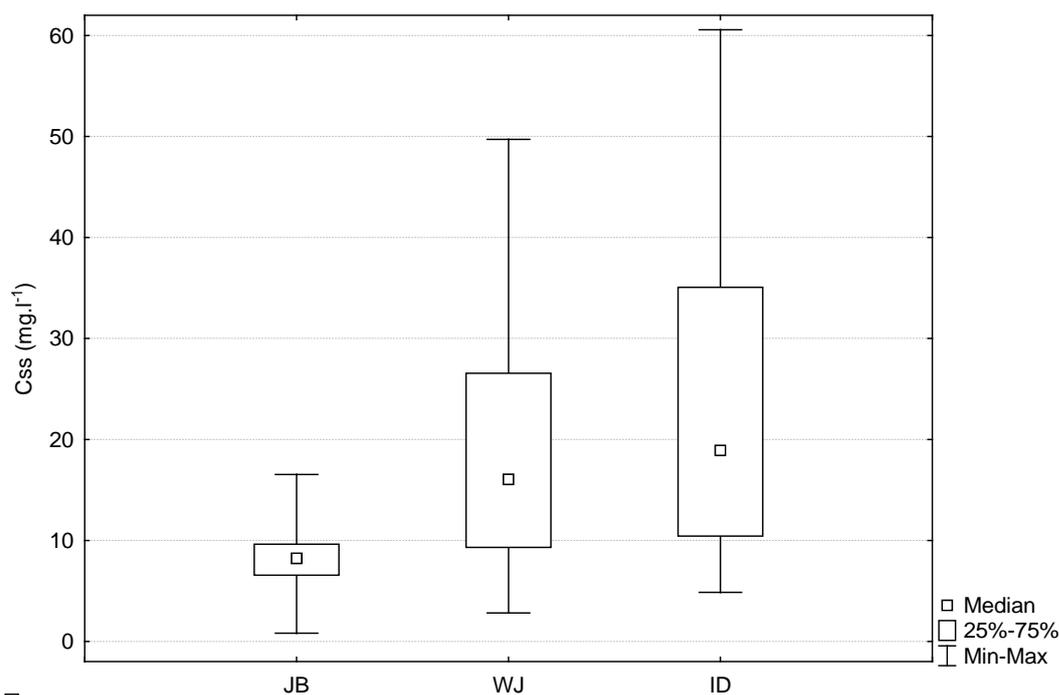


Figura 22. Diagrama de Caixa dos valores de C<sub>ss</sub> para os três locais de amostragem.

Tabela 8 – Variação em porcentagem da C<sub>ss</sub> entre as seções estudadas

Evento	Variação da C <sub>ss</sub>	
	JB para WJ	WJ para ID
	-----%-----	
1	248	73
2	1679	18
3	146	-8
4	76	14
5	26	12
6	-20	41
7	-	4
8	233	32
10	56	0,6
11	54	8
12	119	73

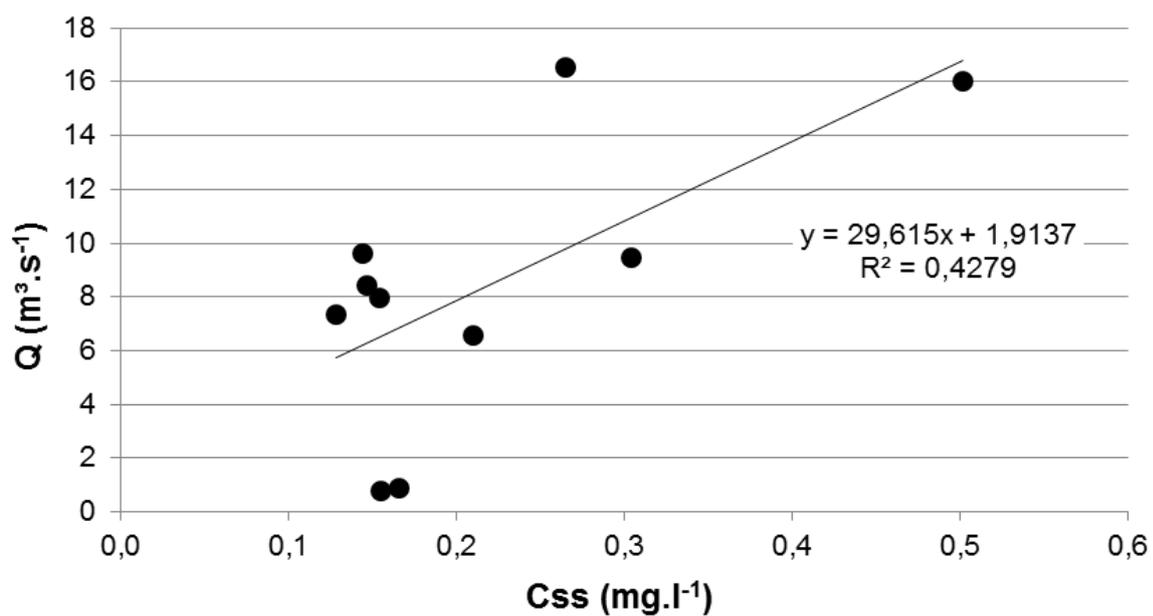
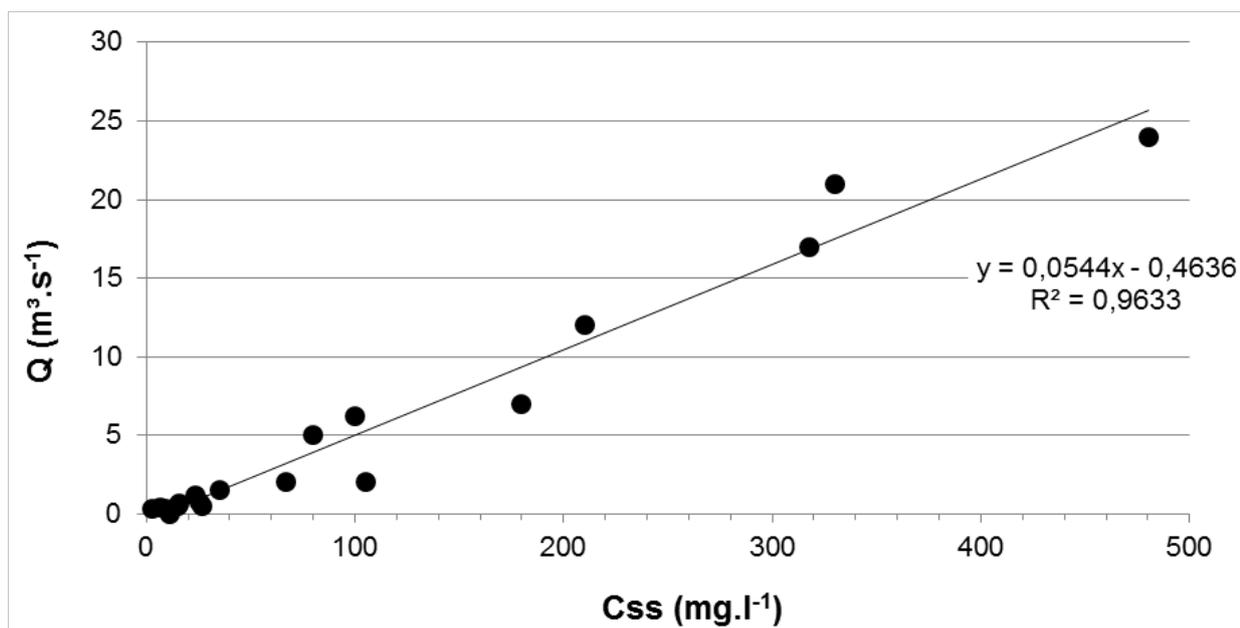
Como a velocidade da corrente de água é baixa na seção JB como foi visto na tabela 5, as partículas maiores das frações de areia passam a apresentar tendência de se depositarem no leito do canal, ocasionando pontos de assoreamento como ilustra a figura 23a. Quando ocorrem eventos que geram um

maior fluxo na descarga líquida no rio (figura 23b), há um aumento nas tensões de cisalhamento sobre as partículas e um ganho na capacidade de transporte do arroio promovendo o transporte dos grãos maiores até então depositadas no canal. Outro parâmetro a ser considerado é o incremento de sedimentos trazidos pelas águas superficiais e outras drenagens para dentro da calha do canal.



Figura 23. Trecho do arroio entre as seções JB e WJ. Ponto de assoreamento (a); evento observado no arroio onde a lamina d'água cobre os pontos assoreados (b).

O transporte de sedimentos não necessariamente acompanha o mesmo regime de descarga líquida de um rio. No caso do arroio Cadena na seção JB apresentou um coeficiente de determinação fraco ( $R^2 = 0,43$ ) entre  $C_{ss}$  e  $Q$  conforme é mostrado na figura 24, apresentando uma mesma vazão para diferentes concentrações de sedimentos. Esse fenômeno pode ser considerado natural e é visto em diversos trabalhos como os de Leli (2011) e Bartelli (2012). O processo de deposição dos sedimentos em corpos d'água está relacionado a diversos fatores como cobertura vegetal do solo, intensidade da precipitação, e especialmente em áreas urbanas a falta de obras que armazenem os sedimentos oriundos dos pavimentos (caixas de areia), que acabam transformando as áreas urbanas em grandes produtoras de sedimentos (POLETO, 2007, p.2). Nas figuras 25 e Figura 26 são apresentadas as correlações para as seções WJ e ID respectivamente. Ambas apresentaram um coeficiente de determinação mais satisfatório em relação ao encontrado na seção JB, mostrando uma maior influência da descarga líquida no transporte de sedimentos em suspensão no trecho do canal.

Figura 24. Correlação linear entre  $C_{ss}$  e  $Q$ , na seção transversal José Barin.Figura 25. Correlação linear entre  $C_{ss}$  e  $Q$ , na seção transversal Walter Jobim.

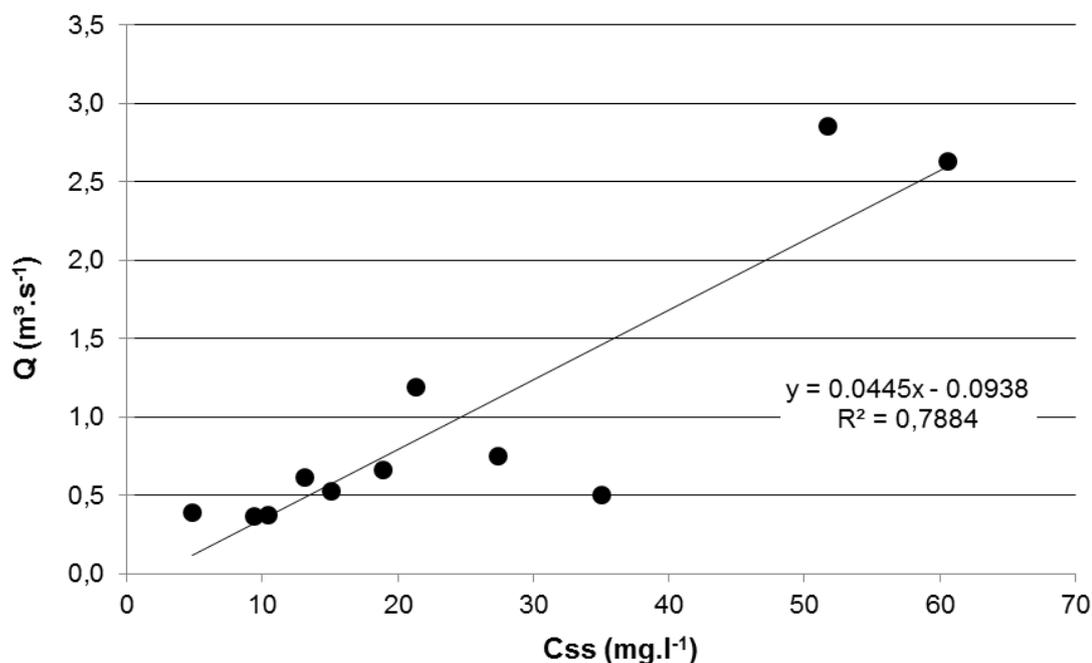


Figura 26. Correlação linear entre  $C_{ss}$  e  $Q$ , na seção transversal Irmã Dulce.

#### 4.1.3 Composição da Carga Suspensa

A carga suspensa ( $C_s$ ) de um rio é produto da erosão e transporte dos sedimentos de toda área de uma bacia hidrográfica. Segundo Leli et al (2010, p. 56) a magnitude da carga suspensa está relacionada além das suas características naturais, com o tipo de desenvolvimento econômico de uma região, ou seja, com o uso e a ocupação do solo da bacia. Ainda segundo o autor a carga suspensa tem uma resposta rápida quando se compara com a carga de fundo, e por isso, a análise da carga suspensa pode também ser utilizada como indicador de degradação ambiental por ocupação antrópica de uma bacia hidrográfica.

Nas figuras 27, 28 e 29 são apresentados os resultados da composição da carga suspensa, para as respectivas seções JB, WJ e ID. É possível analisar que em grande parte dos eventos monitorados para os três locais de amostragem, a concentração de matéria orgânica (MO) foi superior à  $C_{ss}$  na composição da carga suspensa, chegando a valores de até 88% da composição da  $C_s$  no evento 3 na seção ID. Dos doze eventos analisados nessa abordagem dos resultados, em oito deles a concentração de MO foi maior na seção mais a jusante, indicando um

acrécimo desse componente. Com o aumento das vazões em WJ e ID em relação à JB não ocorreu o processo de diluição do material orgânico no canal. Se tratando de um ambiente urbano, isso pode evidenciar que os sistemas de drenagem urbana e esgoto devam estar contribuindo de forma significativa com o incremento de material orgânico ao longo do canal.

Esses resultados são semelhantes aos encontrados por Pião (1995). O autor observou que a concentração de sólidos totais, sólidos dissolvidos e sólidos suspensos aumentava após a passagem do rio pela zona urbana, assim como a condutividade e outros parâmetros que apresentaram comportamentos semelhantes devido à entrada de matéria orgânica da cidade de Itaí no rio.

Poleto (2007. p. 99) avaliando a qualidade dos sedimentos fluviais em uma bacia urbana, verificou que nas amostras coletadas no início dos eventos de chuva, principalmente nos períodos de longa estiagem, ocorreram picos de concentração de matéria orgânica nos sedimentos fluviais em suspensão, mas que, dependendo da intensidade da precipitação, estas concentrações decrescem rapidamente. Segundo o autor isso ocorre principalmente devido ao efeito de lavagem da calha fluvial e das ruas pavimentadas, conhecido como *first-flush*, formado pelo carreamento do material orgânico disponível nas fontes de sedimentos e pela retirada de algas e bactérias filamentosas que se formam no leito da calha fluvial, típicas de locais providos de lançamentos de esgoto in natura e influenciando, portanto, a carga de MO transportada por um determinado período de tempo.

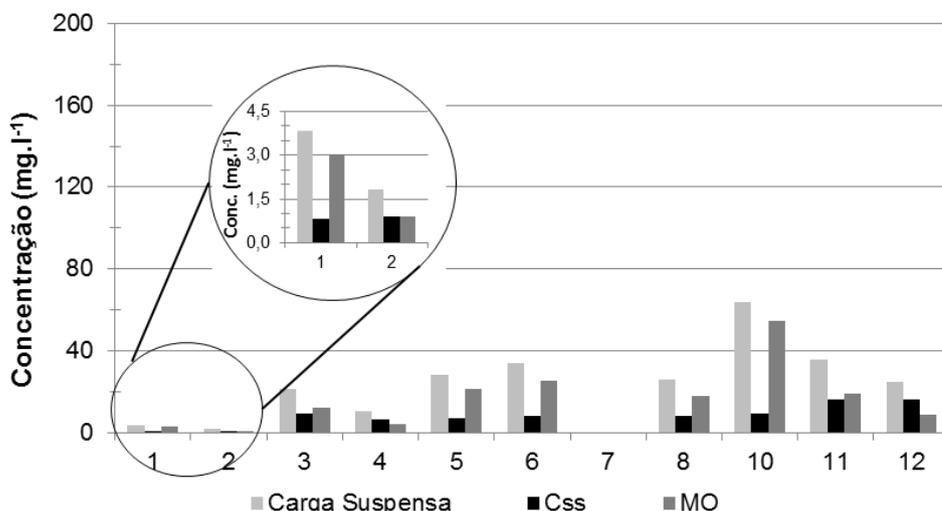


Figura 27. Composição da carga suspensa na seção transversal José Barin.

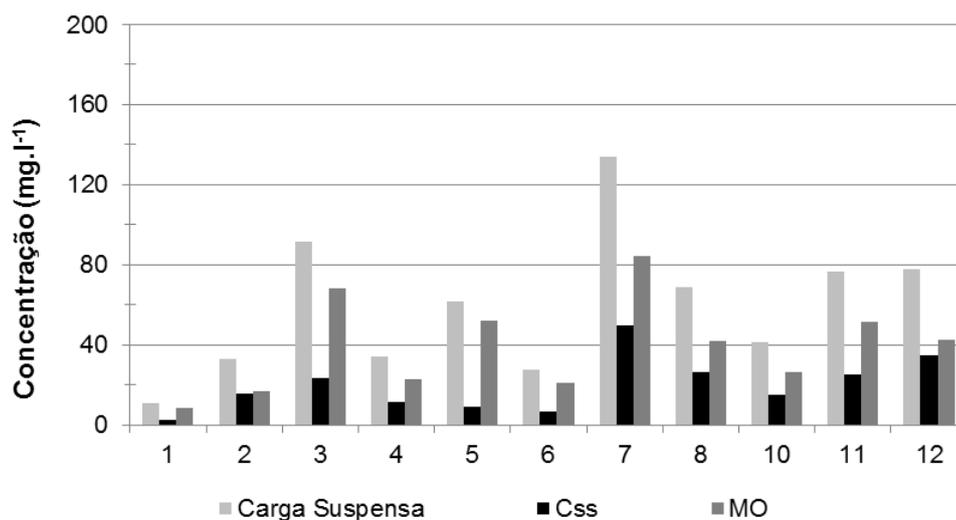


Figura 28. Composição da carga suspensa na seção transversal Walter Jobim.

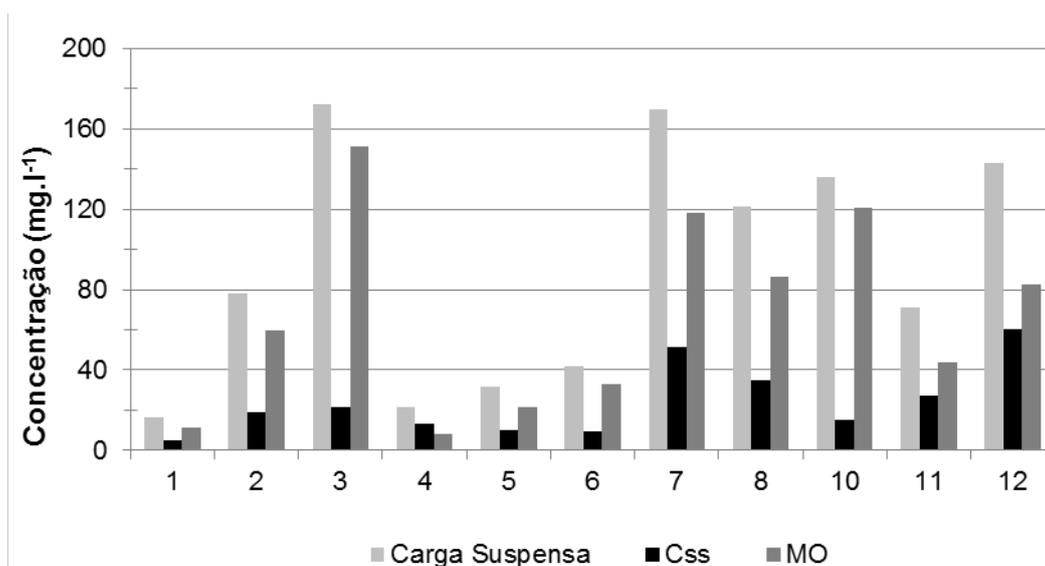


Figura 29. Composição da Carga Suspensa para a seção transversal Irmã Dulce.

As modificações físicas no meio aquático como dragagens, retificações de rios, aterros, construções de portos e marinas, alterações de vazões e fluxo mareal, entre outras, alteram a geomorfologia e a composição da carga suspensa (CAPPUNYS & SWENNEN, 2005, p.1170). De acordo com Poletto & Laurenti (2008, p. 127) essa alteração da carga suspensa de um ambiente aquático acarretará na substituição de espécies autóctones (nativas) anteriores por outras adaptadas ao novo equilíbrio ecossistêmico. Ainda segundo os autores os sedimentos mais finos,

argilosos, ricos em nutrientes e a matéria orgânica (constituída por frações de minerais inorgânicos, materiais orgânicos e bioquímicos) são por suas características físicas e químicas os principais adsorventes para uma série de metais presentes no meio aquático.

Vergotti *et al* (2009, p. 99) executando análises geoquímicas em sedimentos de lagos da bacia do rio Madeira verificou significativa influencia da matéria orgânica na adsorção do mercúrio. Pesquisa desenvolvida por Poletto & Merten (2008) em uma área urbana na cidade de Porto Alegre evidenciou que os sedimentos em suspensão estão apresentando enriquecimento antropogênico em uma proporção de duas ou mais vezes superior às concentrações de referência locais (background) de metais pesados como o zinco, chumbo e cromo sem evidências industriais na área de estudo.

Com o incremento de material orgânico ao longo do canal, e o verificado na literatura é plausível a ideia de que os sedimentos transportados no arroio Cadena estejam contaminados por algum tipo de poluente inorgânico, devido à alta interferência antrópica na bacia.

## **4.2 Variação temporal das características hidrológicas do arroio Cadena**

A análise da variação temporal das características hidrológicas foi realizada com os dados obtidos na seção hidrossedimentométrica da Walter Jobim, em virtude de no local se ter instalado um linígrafo eletrônico, o que permite o registro contínuo da altura da lamina d'água do corpo hídrico. Por meio da relação entre a cota e a vazão medida nos dias de campanha, foi possível traçar a curva chave de vazão. A bacia do arroio Cadena até a seção Walter Jobim possui 23,77 km<sup>2</sup> de área. Esse dado foi utilizado para cálculos da Produção específica de sedimentos em suspensão.

### **4.2.1 Curva chave da vazão líquida**

Na estação WJ foram realizadas 19 medições de vazão, nas quais foram medidas vazões máxima e mínima de 25,05 e 0,24 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>, respectivamente. Na figura 30 é apresentado o gráfico da relação cota x vazão.

A curva chave obtida para a seção WJ é descrita pela equação 7, para 0,008 ≤ h ≤ 0,69 m, apresentando um coeficiente de determinação (R<sup>2</sup>) de 0,97, indicando uma boa correlação entre os dados.

$$Q = 40,39(h + 0,18)^{3,47} \quad (7)$$

$$R^2 = 0,97$$

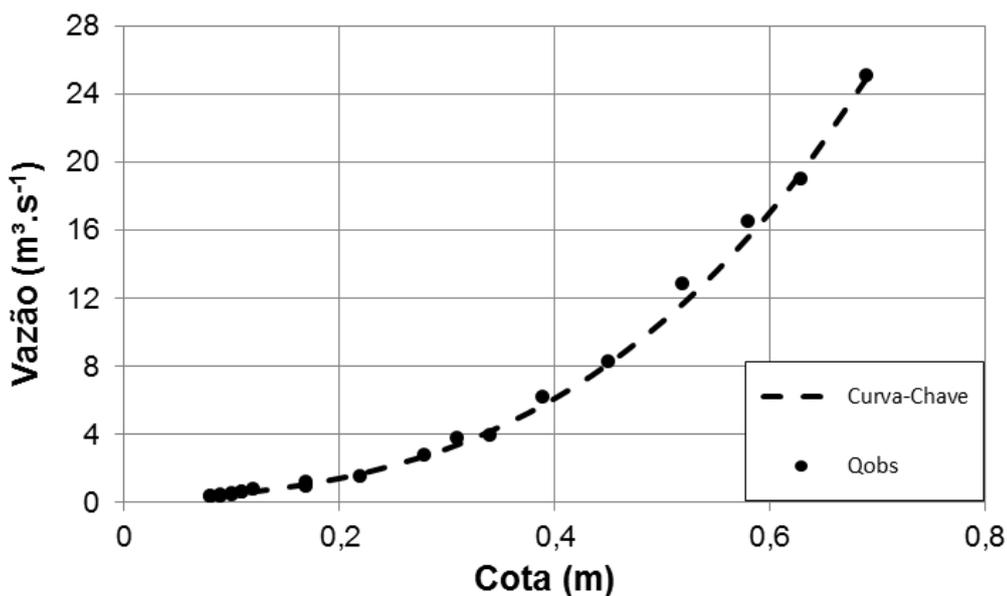


Figura 30. Curva chave da vazão líquida para a seção Walter Jobim, no arroio Cadena.

Como as margens da seção são estáveis, uma vez que possuem muros de contenção, o perfil do canal não apresentou alteração, deixando a curva chave válida para o período de estudo.

#### 4.2.2 Série temporal das precipitações

Os dados mensais de precipitação estão ilustrados na figura 31. A média mensal da chuva no período estudado foi de 137 mm. Percebe-se que há uma boa distribuição nos meses com precipitação acima e abaixo da média ao longo do período, indicando maiores precipitações nos meses mais quentes, e menores índices pluviométricos nos meses mais frios. O mês com maior precipitação foi dezembro de 2012, com um total de 314 mm, que seguido dos meses de janeiro, fevereiro e março de 2013, todos com total acumulado superior à média, apresentaram a estação climática (verão) mais chuvosa da série temporal estudada. Já o mês com menor precipitação foi junho de 2012, mostrando que esse ano foi de extremos dentro da série disponível.

Analisando a tabela 9 observa-se que o mês com o máximo diário precipitado foi maio de 2012 com 130,6 mm, evento que contribuiu com quase totalidade do precipitado no período. Esse evento está ilustrado na figura 32, que apresenta as precipitações em mm, discretizadas em intervalo de tempo de 15 minutos, e as cotas em metros. Já no mês de agosto de 2013 o máximo diário precipitado representa cerca de 15% do total acumulado, indicando que nesse mês as chuvas foram melhor distribuídas ao longo do mês.

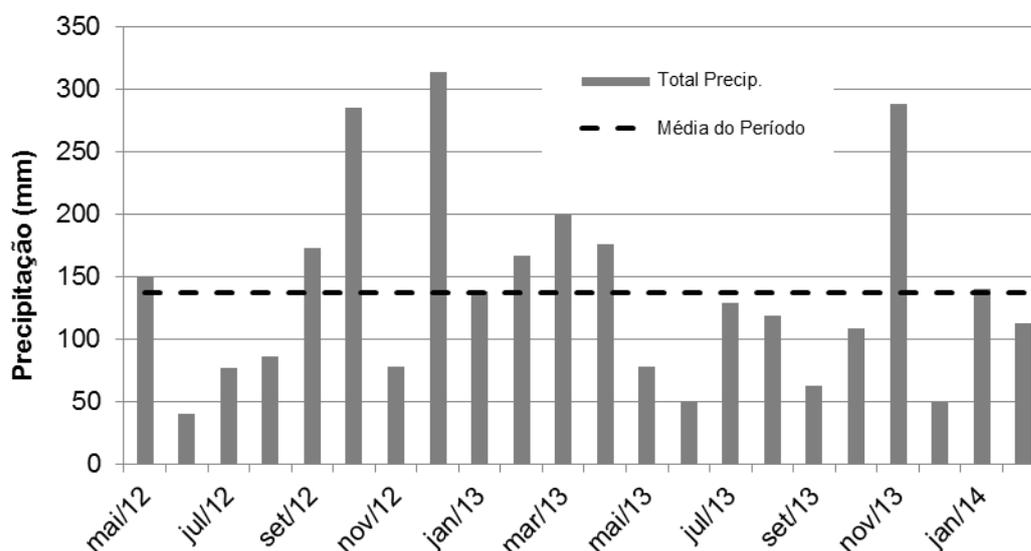


Figura 31. Precipitações acumuladas mensais para o período de estudo.

Tabela 9 – Valores: Total precipitado, médios, máximos diários e desvio padrão da precipitação para o período estudado

Mês/ano	Total	Máximo	Desv. Pad
mai/12	149,2	130,6	23,53
jun/12	40,0	29,6	5,38
jul/12	76,8	33,0	6,93
ago/12	86,4	28,0	7,15
set/12	172,6	69,6	14,38
out/12	284,8	67,8	17,15
nov/12	78,4	31,4	6,91
dez/12	313,8	53,8	16,54
jan/13	138,4	55,0	13,49
fev/13	166,8	65,0	15,99
mar/13	199,2	48,8	13,66
abri/13	176,2	75,8	18,99
mai/13	78,0	37,6	7,13
jun/13	50,4	16,8	3,80
jul/13	128,8	58,6	11,98
ago/13	118,4	17,8	6,43
set/13	63,2	20,6	4,67
out/13	108,2	44,4	9,36
nov/13	287,6	105,8	23,47
dez/13	49,4	22,4	5,00
jan/14	140,6	56,2	10,97
fev/14	113,0	43,0	9,91

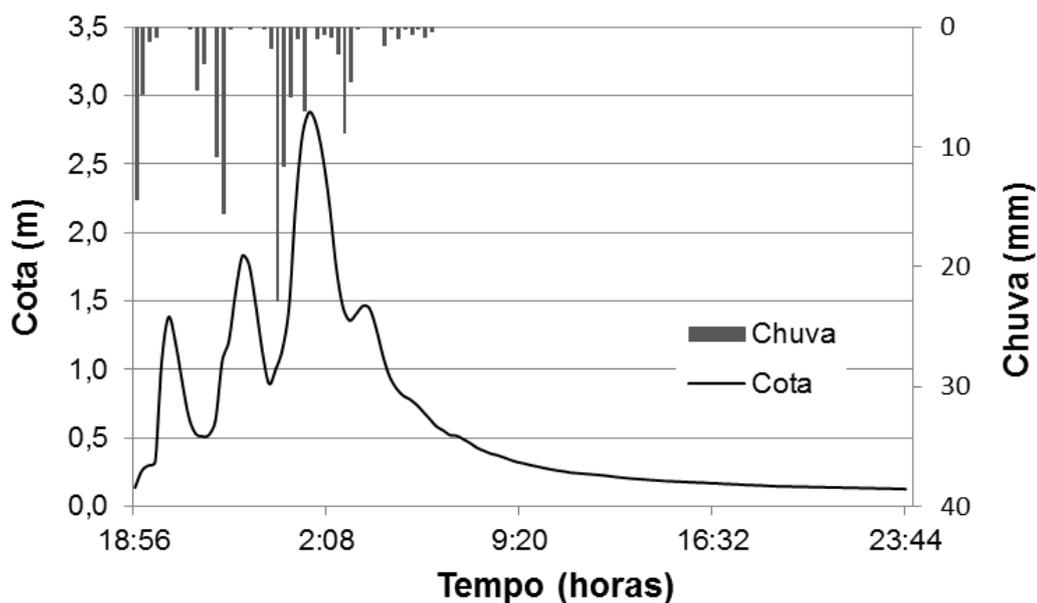


Figura 32. Evento pluviométrico do dia 30/05/2012, maior chuva diária acumulada no período.

#### 4.2.3 Série temporal das vazões líquidas

Na figura 33 são ilustrados os valores das vazões médias mensais na seção WJ. A vazão média no período de estudo foi de  $0,76 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  indicada na figura pela linha tracejada. O período com maior e menor média foram nos meses de novembro de 2013 e agosto de 2012 com  $2,17 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$  e  $0,30 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ , respectivamente.

Caracterizando o regime de vazões do período em estudo, estabeleceu-se a tabela 10, fornecendo assim uma indicação sobre a distribuição dos períodos de águas altas e de estiagem do arroio. Constata-se que as vazões máximas e mínimas diárias registradas foram nos meses de novembro de 2013 e agosto de 2012 com  $25,61$  e  $0,21 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ , respectivamente. As figuras 34 e 35 ilustram os hidrogramas desses períodos. No apêndice A são apresentando os hidrogramas mensais.

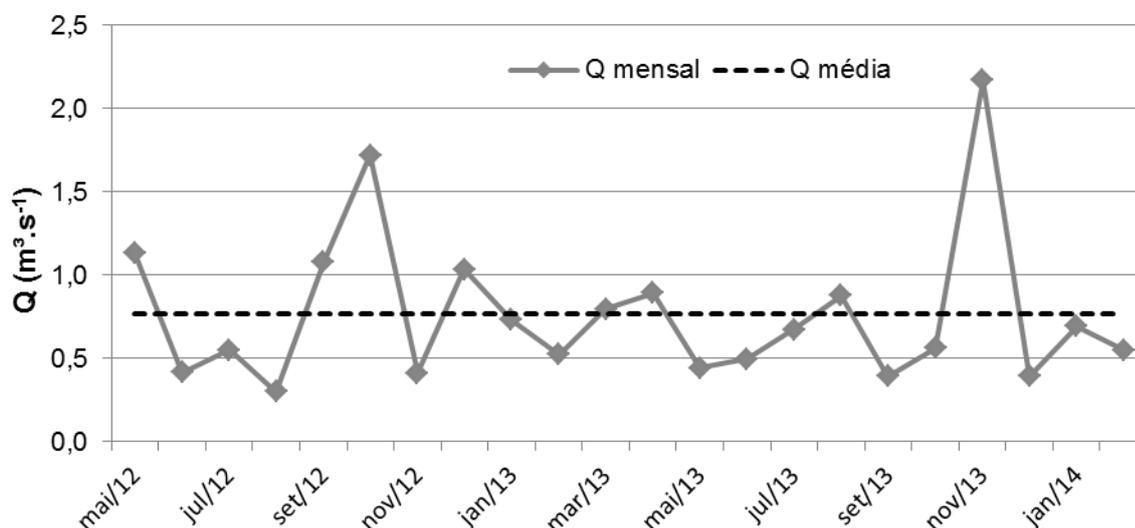


Figura 33. Vazões médias no período de estudo.

Tabela 10 – Valores mensais mínimos, máximos e desvio padrão da vazão líquida ( $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ ) para o período estudado

Mês/ano	Mínimo	Máximo	Desv. Pad.
mai/12	0,33	23,93	4,23
jun/12	0,29	1,38	0,19
jul/12	0,38	2,19	0,37
ago/12	0,21	1,33	0,25
set/12	0,42	12,73	2,25

Mês/ano	Mínimo	Máximo	Desv. Pad.
out/12	0,42	14,27	3,00
nov/12	0,30	1,93	0,30
dez/12	0,32	4,38	1,16
jan/13	0,33	3,72	0,92
fev/13	0,33	1,85	0,38
mar/13	0,34	3,65	0,80
abri/13	0,31	7,95	1,86
mai/13	0,30	2,25	0,34
jun/13	0,37	1,47	0,27
jul/13	0,37	4,82	0,87
ago/13	0,33	9,16	1,60
set/13	0,30	1,34	0,21
out/13	0,35	2,14	0,42
nov/13	0,37	25,61	5,65
dez/13	0,32	0,92	0,12
jan/14	0,32	3,85	0,71
fev/14	0,39	1,83	0,31

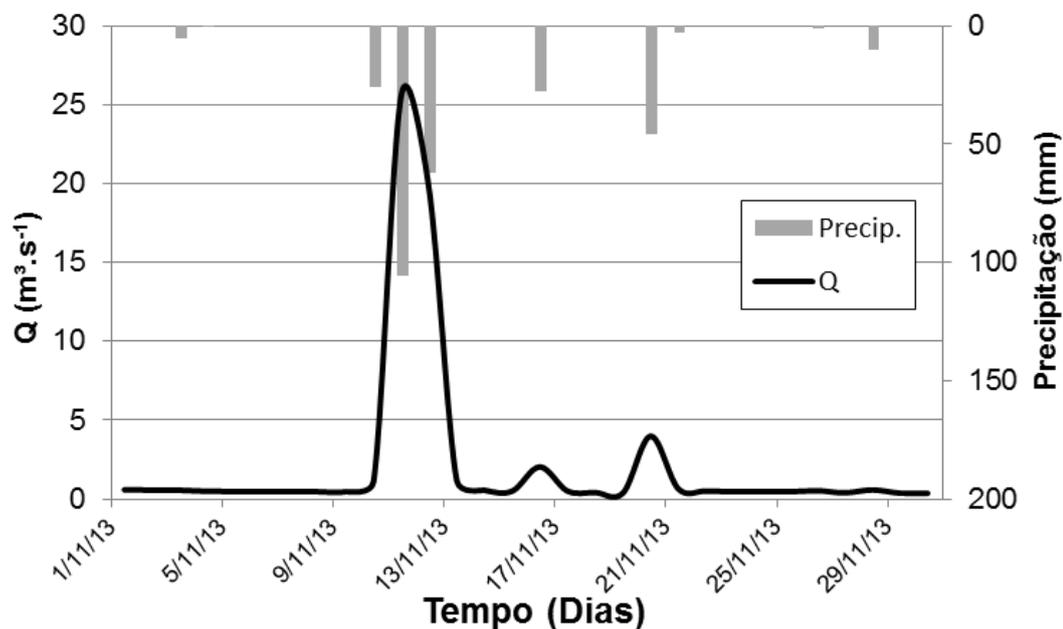


Figura 34. Hidrograma do mês de novembro de 2013.

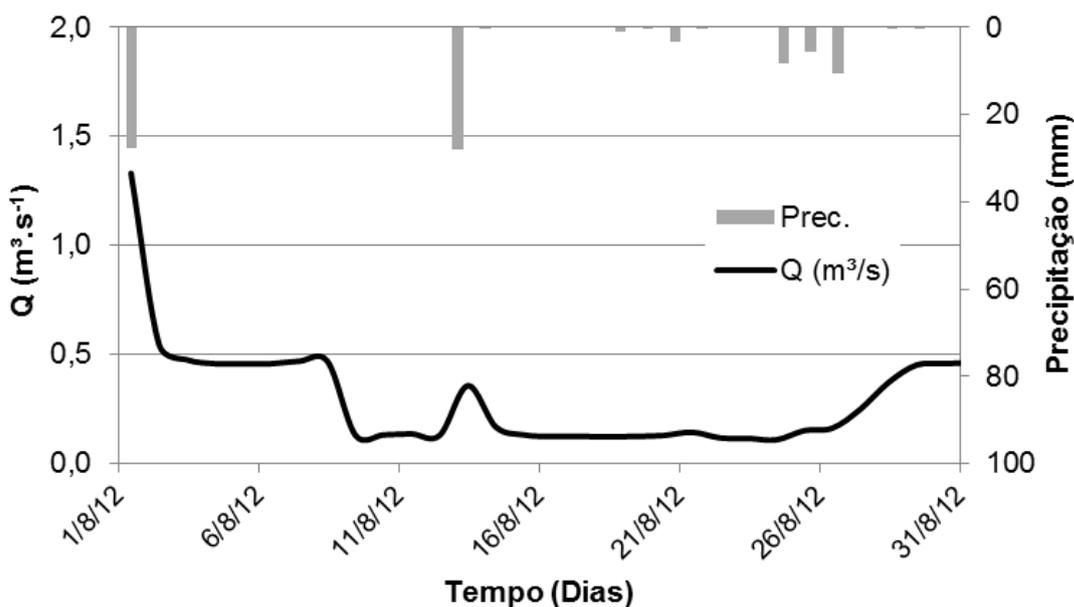


Figura 35. Hidrograma para o mês de Agosto de 2012.

Como método de análise estatística, foi empregado o coeficiente de correlação de Pearson ( $r^2$ ), para verificar a correlação das séries de vazão com a de precipitação. Na tabela 11 são apresentados esses resultados. Empregou-se o  $r^2$  para três condições, (i) para as duas séries completas, (ii) para os meses em que a precipitação foi menor que a média do período (137mm), e (iii) para os meses que a precipitação foi maior que a média do período. Com isso buscou-se avaliar o grau da influência da chuva na descarga líquida nos períodos de baixa precipitação, buscando avaliar o grau da contribuição da drenagem urbana nos meses com baixos índices pluviométricos.

Analisando a tabela 11 observa-se que o coeficiente de Pearson foi menor na condição (ii) apresentando um  $r^2$  de 0,62. Isso mostra que a precipitação é menos influente no regime das vazões quando ela é inferior que sua média, quando comparada com as condições (i) e (iii). Isso também sugere que nos períodos em que a precipitação é menor que a sua média na série, as contribuições oriundas do esgoto passam a exercer uma maior influência sob o regime das vazões.

Tabela 11. Correlações de Pearson ( $r^2$ ) entre Vazão líquida (Q) e a Precipitação (P), para as séries completas de Q e P, para os meses em que P foi maior que 137mm, e para os meses em que P foi menor que 137 mm.

Q x P	$r^2$
Série completa	0,90
P < 137mm	0,62
P > 137mm	0,77

### 4.3 Transporte de sedimentos em suspensão no período de maio/2012 – fev/2014

#### 4.3.1 Curva chave de sedimentos

Por meio dos resultados de vazão e C<sub>ss</sub> obtidos em campo, foi elaborada a curva chave de sedimentos. A curva obtida para a seção WJ é ilustrada na figura 36 e descrita na equação 8, para  $0,3 \leq Q \leq 25.05 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . A curva mostrou ter um bom ajuste, com um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,92.

$$C_{ss} = 25,53Q^{0,92} \quad (8)$$

$$R^2 = 0,92$$

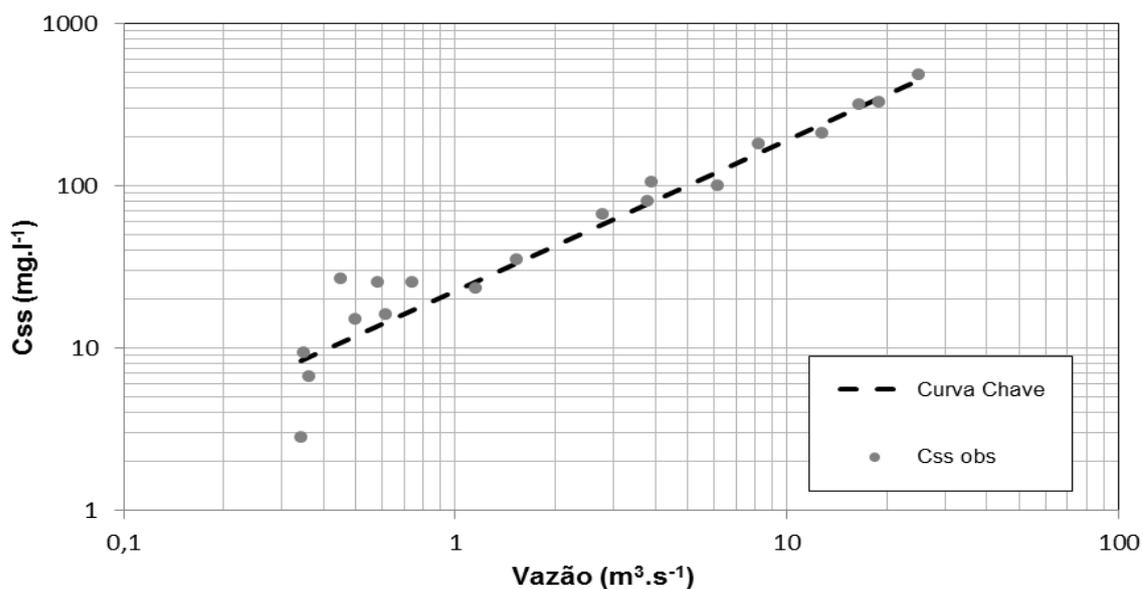


Figura 36. Curva Chave de Sedimentos.

#### 4.3.2 Série temporal da concentração de sedimentos em suspensão

Na figura 37 é ilustrada a Css média mensal para a série temporal observada. Os meses que apresentaram maiores médias na Css foram novembro de 2013 e outubro de 2012 com 41,5 e 35,1 mg.l<sup>-1</sup>, respectivamente. Já os meses com menores valores médios de Css foram agosto de 2012 e setembro de 2013 com 7,28 e 9,49 mg.l<sup>-1</sup>. De modo geral a Css variou acompanhando os regimes das vazões.

Caracterizando o regime sedimentológico estabeleceu-se a tabela 12, com os valores mínimos, médios, máximos e desvio padrão para os meses compreendidos pela série temporal. Observa-se que a Css apresentou comportamento semelhante a das vazões para o período. Há uma grande variação dos valores mensais, acredita-se que isso se deve a variabilidade dos processos sedimentológicos na bacia. Por ser uma bacia que compreende boa parte da malha urbana do centro da cidade, no período de coleta dos dados foram observadas inúmeras construções civis em andamento, que não armazenavam os materiais de construção (areia, brita, etc.) de maneira adequada. Essa irregularidade transforma esses locais em grandes produtores de sedimentos. Em eventos de chuva os sedimentos são transportados pela água que escoar pelos pavimentos impermeabilizados, e por meio da drenagem urbana chegam ao corpo hídrico promovendo um acréscimo elevado da carga suspensa.

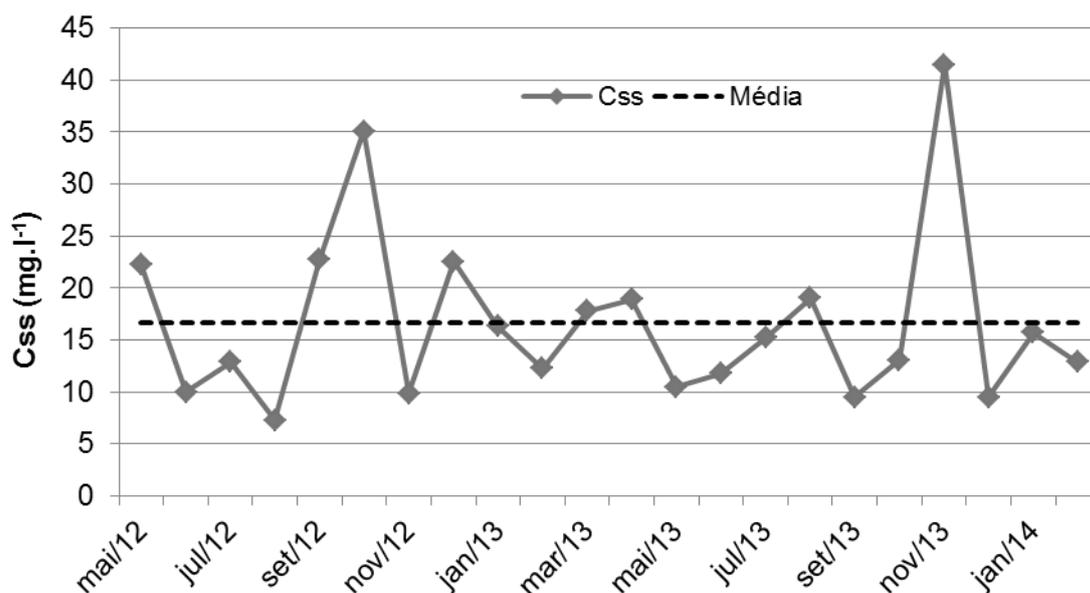


Figura 37. Concentração média de Sedimentos em Suspensão no período estudado.

Tabela 12 – Valores mensais mínimos, médios, máximos e desvio padrão da C<sub>ss</sub> (mg.l<sup>-1</sup>) para o período estudado

Mês/Ano	Mínimo	Média	Máximo	Desv. Pad.
mai/12	8,10	22,30	418,20	73,5
jun/12	7,30	10,01	30,32	4,02
jul/12	9,18	12,87	46,44	7,68
ago/12	2,94	7,28	29,31	5,47
set/12	10,23	22,80	234,04	41,03
out/12	10,11	35,07	259,98	54,52
nov/12	7,40	9,87	41,16	6,17
dez/12	7,79	22,52	87,59	22,86
jan/13	8,20	16,31	75,48	18,29
fev/13	8,20	12,30	39,61	7,95
mar/13	8,31	17,82	74,05	15,99
abri/13	7,59	18,93	151,75	35,15
mai/13	7,40	10,49	47,47	7,02
jun/13	9,07	11,77	32,15	5,71
jul/13	9,07	15,21	95,80	17,05
ago/13	8,20	19,07	172,80	30,03
set/13	7,50	9,49	29,56	4,39
out/13	8,63	13,06	45,41	8,60
nov/13	9,00	41,50	445,20	98,4
dez/13	7,90	9,52	20,82	2,52
jan/14	7,79	15,70	77,90	14,18
fev/14	9,52	12,89	39,30	6,53

#### 4.3.3 Produção de sedimentos em suspensão

A maior ou menor carga sólida transportada pelos cursos d'água reflete a erosão que está ocorrendo numa bacia. Uma maneira de avaliar o efeito das atividades humanas e mudanças climáticas em tendências temporais do transporte de sedimentos é por meio de um estudo da evolução da produção de sedimentos com o tempo. Este tipo de estudo mostra que pode estar ocorrendo maior erosão, com o maior uso do solo, devido ao aumento da população de uma região (CARVALHO, 2008, p. 349).

Esse tipo de análise, também sugerido por Restrepo (2005) e Leli (2011), mostra a tendência do fluxo de sedimentos em relação à vazão. Se as duas variáveis, vazão e Pss mostram tendências similares, a linha ascendente não se modificará no tempo. Caso a linha ligando os pontos tenha um desvio para a direção do eixo vertical conclui-se que o processo de degradação na bacia foi acentuado. Um desvio da linha para o eixo horizontal indica depósitos do sedimento ou redução da erosão na bacia, conforme sugerido por Carvalho (2008).

Na tabela 13 são apresentados os valores mensais da Pss e a figura 38 ilustra os valores mensais acumulados da produção de sedimentos em suspensão (Pss) em função das descargas líquidas correspondentes acumuladas. Esse estudo permitiu a verificação de que no período monitorado o arroio Cadena não apresentou desvios significativos no seu comportamento sedimentológico.

Uma análise mais detida nos valores mostrou que a produção de sedimentos em suspensão na bacia não apresentou alterações significativas. A produção de sedimentos aumentou 25% entre os meses de outubro e novembro de 2013 e 45% entre os meses de setembro de 2012 e outubro de 2012. Esses aumentos fazem parte da variabilidade intra-anual climática, pois são épocas de chuvas com maior erosividade. Minella *et al* (2007, p. 1639) identificando a contribuição das principais fontes de sedimentos em duas pequenas bacias rurais no estado do Rio Grande do Sul, verificaram que o manejo do solo para cultivo do fumo, bem como as condições de precipitação, são considerados os fatores controladores da variabilidade intra-anual da produção de sedimentos nas bacias de estudo.

Dotto *et al* (2007) avaliaram a acumulação e o balanço de sedimentos em superfícies asfálticas na bacia do Arroio Cancela, sub bacia do Cadena. Segundo os

autores apenas o evento de maior precipitação transportou toda a carga de sedimentos presente na rua. Ainda de acordo com Dotto et al (2007, p. 121) os eventos típicos de precipitação removem apenas uma parte dos sedimentos que estão na superfície asfáltica. Isso ocorre porque parte dos sedimentos se aderem ao asfalto dos pavimentos (sedimentos fixos), necessitando de uma grande energia para transportá-los. Como a bacia do arroio Cadena é predominantemente urbana, nos meses com chuvas mais erosivas o fornecimento de sedimentos é intensificado, resultado da lavagem das ruas e calçadas devido à alta impermeabilização na bacia.

Tabela 13 – Distribuição mensal da Produção de sedimentos em suspensão (Pss)

Mês/Ano	Pss (ton.km <sup>-2</sup> . mês <sup>-1</sup> )	Mês/Ano	Pss (ton.km <sup>-2</sup> . mês <sup>-1</sup> )
mai/12	79,79	abri/13	43,72
jun/12	10,78	mai/13	12,80
jul/12	19,61	jun/13	15,18
ago/12	6,02	jul/13	28,36
set/12	63,66	ago/13	46,38
out/12	166,84	set/13	9,68
nov/12	10,54	out/13	20,28
dez/12	64,47	nov/13	234,02
jan/13	32,93	dez/13	10,35
fev/13	14,58	jan/14	30,06
mar/13	39,22	fev/14	11,75

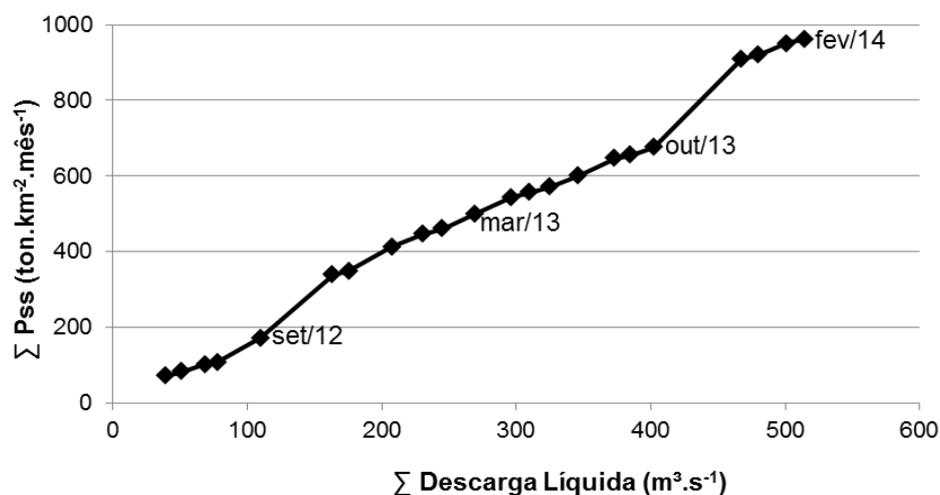


Figura 38. Evolução da produção de sedimentos em suspensão no arroio Cadena.

A produção específica de sedimentos em suspensão da bacia do arroio Cadena correspondente ao ano de 2013 foi de  $42,29 \text{ t.km}^{-2}.\text{ano}^{-1}$ . De acordo com Lima et al. (2003), quando esse índice é inferior a  $70 \text{ t.km}^{-2}.\text{ano}^{-1}$ , a produção de sedimentos da área de drenagem pode ser considerada baixa. Valores de 43 a  $135 \text{ t.km}^{-2}.\text{ano}^{-1}$  foram encontrados por Lima et al. (2004) ao longo da bacia do Rio Piquiri, cuja produção de sedimentos específica variou entre baixa e moderada.

Segundo Pereira et al. (2010), a produção de sedimentos depende de uma série de fatores naturais (chuva, solo, relevo), mas é determinada pelo uso do solo. De acordo com o tipo de solo, seu uso e ocupação e as características físicas das bacias, é possível inferir sobre a tendência ao aporte de sedimentos. Como a maior parte do uso do solo na bacia do Cadena é composta por áreas impermeáveis (telhados, ruas e calçadas), grandes alterações no aporte de sedimentos no canal não são esperadas. Caiado (1994) concluiu, com relação aos sólidos carregados em suspensão, que a quantidade de sedimento transportada para os rios parece estar bem relacionada ao percentual da bacia que está sofrendo ações antrópicas.

O estudo sedimentológico realizado permitiu mostrar as transformações por que tem passado a bacia hidrográfica em relação a problemas de uso e ocupação do solo. O arroio Cadena, no trecho de estudo, não apresenta tendência de erosão e nem de deposição, apresentando nos meses de setembro a novembro um aumento da taxa de sedimentos devido ao período de maior erosividade das chuvas. Ainda é recomendável que esse estudo seja realizado para um maior período de tempo monitorado, a fim de captar melhor a variabilidade dos processos sedimentológicos.

#### **4.4 Variáveis de controle da C<sub>ss</sub> em eventos**

As séries de precipitação e vazão foram discretizadas em intervalos de 15 minutos, obtendo-se séries temporais para todo o período de monitoramento (01/05/2012 a 28/02/2014). A partir das séries com os dados monitorados na bacia foram delimitados os eventos com medição da C<sub>ss</sub>. As características dos eventos são apresentadas na tabela 14, e no apêndice B são ilustradas as C<sub>ss<sub>medidas</sub></sub> nos respectivos hidrogramas.

Foram analisados 17 eventos onde ocorreram medições da C<sub>ss</sub>, o primeiro ocorreu dia 12/05/12 e o último no dia 09/11/13. A vazão máxima variou entre 0,47 e 24,42 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> e a Q<sub>méd</sub> apresentou uma média de 1,60 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> nos eventos analisados. O escoamento superficial teve uma média de 4,73 mm nos eventos estudados, variando de 0,04 a 18,43 mm, nos eventos 7 e 13 respectivamente.

O valor médio da C<sub>ss<sub>medida</sub></sub> foi de 119,36 mg.l<sup>-1</sup>. O evento com maior C<sub>ss<sub>medida</sub></sub> foi o evento 17 com 480,62 mg.l<sup>-1</sup>, evento que também apresentou a maior vazão máxima. A figura 39 ilustra o hidrograma desse evento.

A precipitação total acumulada dos eventos variou de 2,20 a 34,20 mm, para o evento 2 e 15 respectivamente. O tempo de pico teve variação de 1,25 a 8,00 horas e média de 4,00 horas indicando uma rápida resposta da bacia aos eventos de precipitação, situação gerada pela grande área impermeável da região (Figura 7).

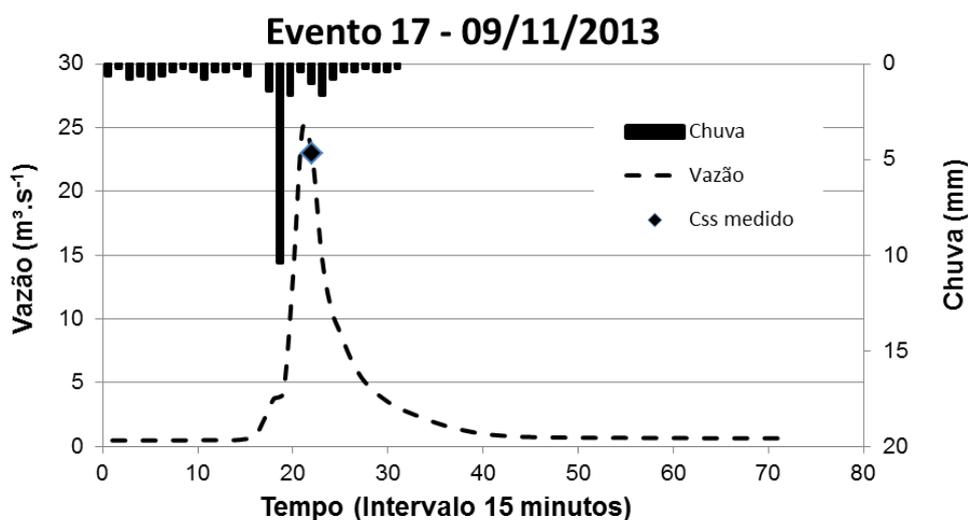


Figura 39. Hidrograma do evento 17.

Tabela 14 – Características das variáveis analisadas para os eventos monitorados.

Evento	Data Início	Duração (h)	Condições Pré-evento					Condições do evento								
			Vazão		Precipitação			Precipitação			Vazão			Sedimento		
			Q <sub>a</sub> ----(m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )---	Q <sub>a1</sub>	API <sub>5</sub> mm	API <sub>3</sub> mm	API <sub>1</sub> mm	Pt mm	t <sub>pico</sub> h	IP mm	Q <sub>sup</sub> mm	TiQ m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> .h <sup>-1</sup>	Q <sub>máx</sub> m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup>	Q <sub>méd</sub> m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup>	CSS <sub>medida</sub> mg.l <sup>-1</sup>	
1	12/05/12	18,50	0,35	0,34	0,65	0,00	0,00	16,40	1,50	14,60	3,99	5,29	8,35	1,25	66,70	
2	15/06/12	21,50	0,43	0,43	1,95	0,30	0,00	2,20	6,00	2,20	0,22	0,01	0,48	0,46	26,54	
3	17/06/12	9,75	0,49	0,44	2,25	1,80	0,40	29,40	8,00	29,00	12,13	2,44	20,03	1,90	180,00	
4	03/07/12	8,75	0,44	0,38	0,20	0,20	0,20	7,00	3,25	7,00	0,38	0,14	0,92	0,61	23,38	
5	06/07/12	3,25	5,78	3,01	39,08	38,43	25,60	10,00	1,25	9,00	2,14	8,71	16,16	8,51	100,01	
6	31/07/12	16,00	0,44	0,44	2,92	2,27	0,00	27,40	6,50	27,20	10,13	3,34	22,15	1,12	330,58	
7	25/02/12	8,75	0,36	0,37	2,45	0,00	0,00	3,00	3,50	3,00	0,04	0,03	0,47	0,39	6,71	
8	03/03/13	11,50	0,90	1,60	28,65	28,00	28,00	14,80	1,75	9,00	2,92	7,04	13,23	2,72	105,24	
9	04/03/13	8,00	0,43	0,86	26,45	26,00	6,20	4,40	3,50	4,40	0,24	0,11	0,83	0,57	15,21	
10	09/03/13	8,50	0,86	2,14	30,45	24,40	24,40	7,20	3,25	6,20	1,48	0,82	3,57	1,66	23,32	
11	29/04/13	8,25	0,32	0,31	1,92	1,27	1,20	7,40	2,75	7,40	0,62	0,42	1,49	0,68	11,53	
12	12/05/13	14,50	0,32	0,32	0,82	0,37	0,20	14,40	2,25	11,20	1,92	0,85	2,23	0,94	35,03	
13	19/05/13	15,00	0,36	0,35	2,32	0,40	0,40	34,20	6,25	31,60	18,43	3,19	20,29	2,31	210,00	
14	09/08/13	12,50	0,39	0,38	0,85	0,40	0,40	9,20	5,25	5,60	1,47	0,13	1,08	0,59	16,02	
15	19/05/13	23,50	0,41	0,40	10,05	9,20	2,20	15,60	4,75	15,60	7,00	1,76	8,77	1,59	80,25	
16	15/09/13	18,50	0,32	0,32	0,45	0,00	0,00	20,40	3,25	18,40	8,00	5,93	19,61	1,96	318,07	
17	09/11/13	17,50	0,48	0,46	0,45	0,00	0,00	26,20	5,00	23,40	9,25	4,79	24,42	2,59	480,62	
Média	-	-	0,77	0,74	8,94	7,83	5,25	14,66	4,00	13,22	4,73	2,65	9,65	1,76	119,36	

Q<sub>a</sub>: vazão antecedente; Q<sub>a1</sub>: vazão antecedente de 1 dia; API<sub>5</sub>: Índice de precipitação antecedente de 5 dias; API<sub>3</sub>: Índice de precipitação antecedente de 3 dias; API<sub>1</sub>: Índice de precipitação antecedente de 1 dia; Pt: Precipitação total; t<sub>pico</sub>: tempo de pico; IP: Índice de precipitação; Q<sub>sup</sub>: escoamento superficial; TiQ: Taxa de incremento de vazão; Q<sub>máx</sub>: vazão máxima; Q<sub>méd</sub>: vazão média; CSS<sub>medida</sub>: Concentração de sedimentos em suspensão medida.

Após a determinação das características das variáveis de controle da  $Css_{medida}$  procedeu-se a análise de correlação entre essas variáveis (variáveis independentes) e a  $Css_{medida}$  (variável dependente). Na tabela 15 é apresentado o resultado do coeficiente de correlação de Pearson entre  $Css_{medida}$  e as variáveis independentes. A tabela completa com os resultados das correlações de todas as variáveis está no apêndice C.

Das variáveis analisadas a que melhor se relacionou com a variável dependente foi a  $Q_{máx}$  do evento com  $r^2 = 0,95$ . Já as variáveis menos significativas foram  $T_{pico}$ ,  $AP_1$  e  $AP_3$ . As variáveis de precipitação antecedente não apresentaram correlações significativas.

As variáveis ligadas a vazão do evento foram as que apresentam maior correlação significativa com a  $Css_{medida}$ , seguida das variáveis ligadas a precipitação dos eventos. As variáveis pré-evento, incluindo as da vazão antecedente não apresentaram correlações significativas com a  $Css_{medida}$ .

Tabela 15 – Resultados do coeficiente de correlação de Pearson entre a variável dependente ( $Css_{medida}$ ) e as variáveis independentes.

	Variáveis	$Css_{medida}$
Pré-evento	$Q_a$	0,30
	$Q_{a1}$	0,14
	$API_5$	0,21
	$API_3$	0,12
	$AP_1$	0,06
Evento	Pt	<b>0,87</b>
	$T_{pico}$	0,16
	IP	<b>0,85</b>
	$Q_{sup}$	<b>0,70</b>
	TiQ	<b>0,84</b>
	$Q_{máx}$	<b>0,95</b>
	$Q_{méd}$	<b>0,76</b>

\*Os dados destacados em negrito são aqueles significativos ( $p < 0,05$ ).

Em um estudo semelhante, usando a produção específica de sedimentos em suspensão ( $Pss$ ), como variável dependente, Duvert *et al* (2012) encontraram forte correlação da  $Pss$  com a  $Q_{máx}$  em seu estudo para oito pequenas bacias

hidrográficas localizadas na Espanha, França e México. Segundo os autores essa correlação positiva é explicada pelo fato de que a  $Q_{m\acute{a}x}$  não é apenas o principal agente causador da erosão hídrica pelo escoamento superficial, mas é também o principal agente de transporte de sedimentos da bacia para os canais.

Cardoso (2013) obteve também forte correlação da Pss com a  $Q_{m\acute{a}x}$  e Pt em três bacias sequenciais, montanhosas e pequenas no município de Rio Negrinho – SC. Zabaleta *et al* (2007) analisando três pequenas bacias no País Basco também encontraram boas correlações entre a precipitação, vazão e Pss para algumas de suas bacias. Conforme os autores, a forte correlação entre essas variáveis sugere que estas bacias apresentam uma resposta direta na vazão e na produção de sedimentos durante eventos de chuva.

#### 4.4.1 Modelo de regressão

As variáveis calculadas para os eventos que apresentaram maior coeficiente de correlação de Pearson com a  $Css_{medida}$  foram as variáveis relacionadas à vazão do evento, seguida das variáveis relacionadas à precipitação dos eventos. As variáveis  $Q_{sup}$ ,  $TiQ$ ,  $Q_{m\acute{a}x}$  e  $Q_{m\acute{e}d}$  (vazão do evento) apresentam forte correlação entre si, assim como as variáveis relacionadas a precipitação do evento (Pt, IP) (Apêndice C). Para diminuir a colinearidade, foram selecionadas duas variáveis independentes para aplicação no modelo de regressão múltipla, uma relacionada à vazão, e outra à precipitação do evento. Nesse contexto as variáveis escolhidas foram as que apresentaram maior correlação com a  $Css_{medida}$ . Essas variáveis foram vazão máxima ( $Q_{m\acute{a}x}$ ) e precipitação total (Pt) (tabela 15).

A equação do modelo de regressão múltipla está apresentada na equação (9).

$$Css_{medida} = - 10,0 - 0,78.Pt + 14,6.Q_{m\acute{a}x} \quad (9)$$

Na tabela 16 é apresentado o resultado estatístico do modelo de regressão múltipla. O coeficiente de determinação  $R^2$  ajustado foi de 0,77, considerado um valor satisfatório, com as variáveis independentes explicando 90% da  $Css_{medida}$ . No entanto a variável Pt não foi significativa, apresentando um p-level maior que 5%, e também a variável Pt explicou apenas 0,05% da  $Css_{medida}$ .

Isso ocorreu por causa da forte correlação que a  $Q_{máx}$  apresenta com a Pt ( $r^2 = 0,87$ ) e que ambas apresentam com a  $Css_{medida}$ . Desse modo a Pt não contribuiu para explicar a variância que ainda não foi explicada pelo modelo. De acordo com Naghettini & Pinto (2007, p.389) em situações onde as variáveis explicativas são fortemente correlacionadas podem ocorrer problemas na regressão múltipla, pois as variáveis colineares não fornecem novas informações para o modelo.

Os resíduos ilustrados na figura 40 do modelo de regressão múltipla tiveram uma distribuição normal.

Tabela 16 – Resultados do modelo de regressão múltipla

	$\beta$	B	p-level
Intercepto		-10,01	0,00
Pt	-0,05	-0,78	0,82
$Q_{máx}$	0,94	14,59	0,00

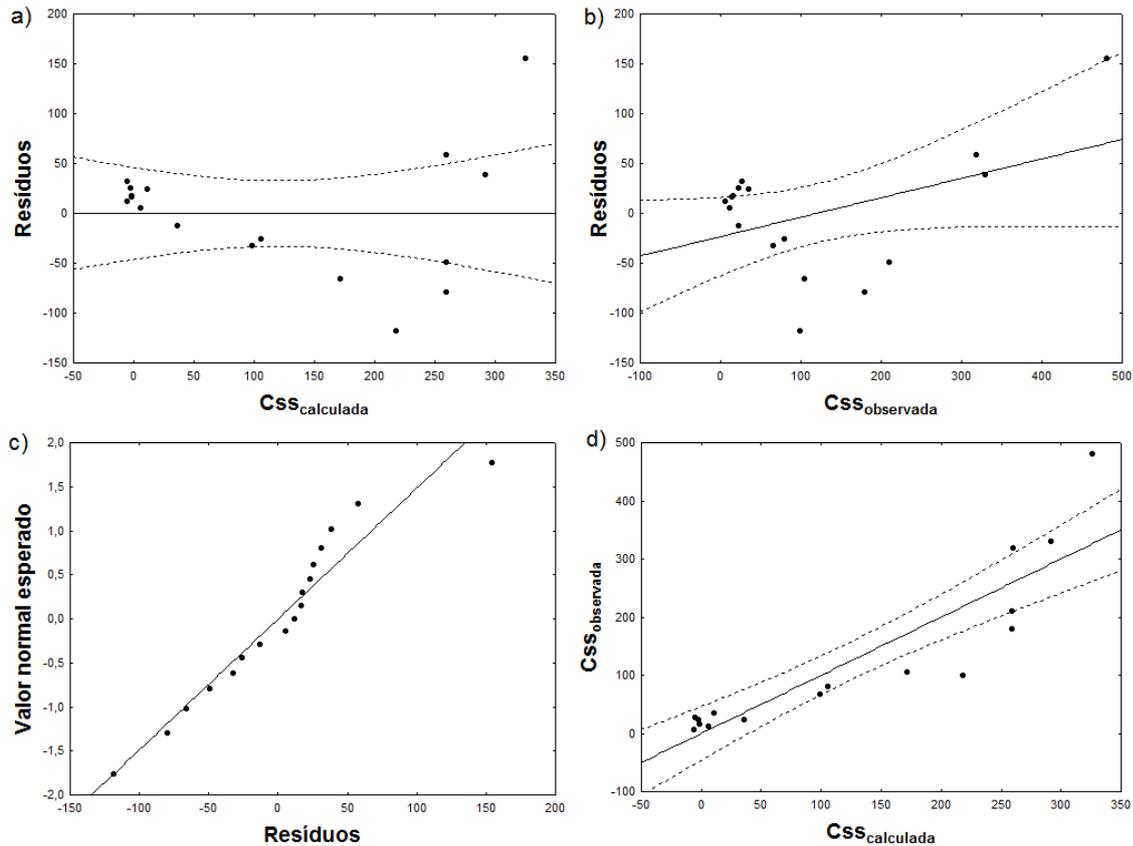


Figura 40. Resultado das análises dos resíduos do modelo de regressão múltipla. a) e b) são os gráficos dos resíduos com os valores de C<sub>ss</sub> calculados e observados; c) plot normal dos resíduos e d) gráfico entre os valores calculados e observados.

Como a variável Pt não contribuiu significativamente (considerando um nível de significância de 5%) com o modelo, elaborou-se então um modelo de regressão simples, tendo como variável independente a  $Q_{\text{máx}}$ . Como não existe transporte de sedimentos quando a vazão é zero, então o intercepto utilizado no modelo também foi forçado a passar pelo zero.

Na tabela 17 são apresentados os resultados da análise de regressão simples entre  $C_{ss\text{medida}}$  e  $Q_{\text{máx}}$  para a bacia do presente estudo e os resultados das mesmas análises apresentados por Cardoso (2013). A figura 41 ilustra essa regressão para a bacia do Cadena. A equação obtida no modelo estatístico de regressão linear simples é apresentada na equação 10.

$$C_{ss\text{medida}} = 13,0 \cdot Q_{\text{máx}} \quad (10)$$

O coeficiente de determinação ( $R^2$  ajustado) foi de 0,78, esse resultado sugere uma boa relação existente entre essas variáveis para a bacia e confirmam a afirmação de Duvert et al. (2012, p.54) de que a vazão máxima pode ser uma boa indicadora do transporte de sedimentos em suspensão em eventos para pequenas bacias hidrográficas. Bons resultados dessa relação também foram encontrados por Cardoso (2013) (Tabela 17) que relata que uma mudança unitária da  $Q_{m\acute{a}x}$  é mais significativa em bacias maiores que em menores.

O erro médio da estimativa da bacia do Cadena foi inferior aos encontrados por Cardoso (2013), que encontrou valores maiores para as bacias maiores. O erro padrão da estimativa mede o desvio médio entre os valores reais de  $Y$  e os valores estimados de  $\hat{Y}$ . Esse maior desvio médio em bacias maiores, segundo Duvert et al. (2012), pode ser explicado, porque com o aumento da área existe maior possibilidade de deposição dos sedimentos no canal, que fornecem um acréscimo de sedimentos em eventos com energia suficiente para remobilizá-los.

Tabela 17 – Resultados da regressão linear entre  $Css_{medida}$  e  $Q_{m\acute{a}x}$  para a bacia de estudo e resultados apresentados por Cardoso (2013)

	Bacia	Área (km <sup>2</sup> )	$\beta$	$R^2$ ajustado	Erro padrão da estimativa	p-level
	Cadena	23,77	0,90	0,78	63,71	0,00
Cardoso (2013)	RB01	64,11	-	0,94	292,36	-
	RB10	11,45	-	0,80	242,64	-
	RB11	6,95	-	0,89	98,63	-

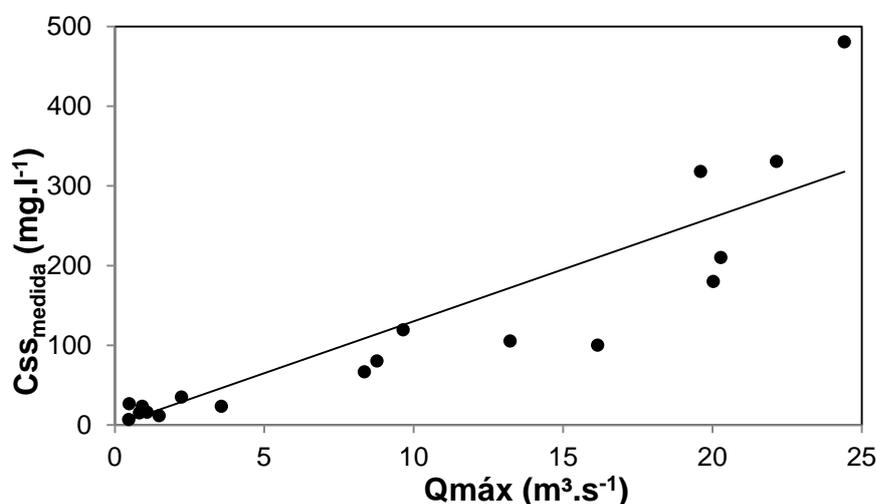


Figura 41. Regressão linear entre a  $Css_{medida}$  e a  $Q_{m\acute{a}x}$  em eventos para a bacia do Cadena.

O modelo expresso na equação 10 só é válido para os eventos que não ultrapassem a cota máxima utilizada no estudo. Os resultados colaboram com o afirmado por Duvert et al (2012) e Cardoso (2013) e mostram que a  $Q_{máx}$  pode ser uma boa indicadora do transporte de sedimentos em suspensão em eventos de chuva.

## 5 CONCLUSÕES

- i) A velocidade média da vazão, na maioria dos eventos analisados foi maior na seção WJ, onde o canal possui as margens revestidas com gabiões e leito retificado e enrocado. A seção JB apresentou um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) fraco de 0,43 entre  $C_{ss}$  e Q. Já nas seções WJ e ID foram obtidos bons coeficientes,  $R^2 = 0,96$  e  $R^2 = 0,79$ , respectivamente. O melhor ajuste na seção WJ foi possível, devido ao maior número de medições realizadas e a um maior monitoramento em eventos de alta vazão.  
A composição da carga suspensa teve a matéria orgânica como maior constituinte na maioria das análises, chegando até o valor de 88% do total da carga suspensa. Em oito dos doze eventos a concentração de MO foi maior na seção mais a jusante, indicando que existe um incremento de material orgânico ao longo do arroio.
- ii) A precipitação é menos influente no regime das vazões quando ela é inferior que sua média mensal (137mm). Isso sugere que nos períodos em que a precipitação é menor que a sua média na série, as contribuições oriundas da drenagem urbana e do sistema de esgoto passam a exercer uma maior influência sobre o regime das vazões.
- iii) No período de estudo o arroio Cadena não apresentou tendência à erosão e nem a deposição. Foi observado que nos meses de setembro a novembro há um significativo aumento na produção de sedimentos na bacia. Esse fenômeno faz parte da variabilidade intra-anual climática da região, pois são épocas de chuvas com maior erosividade (intensidade).
- iv) As variáveis relacionadas à vazão e a precipitação dos eventos analisados apresentaram uma boa correlação com a  $C_{ss_{medida}}$ . O modelo de regressão

múltipla apresentou um bom ajuste, porém a variável Pt não contribuiu significativamente para explicar a variável dependente. O modelo de regressão simples apresentou um bom ajuste ( $R^2$  ajustado = 0,78), com a variável independente ( $Q_{m\acute{a}x}$ ) explicando 90% da variação da variável dependente. Por fim os resultados mostraram que a  $Q_{m\acute{a}x}$  pode ser uma boa indicadora do transporte de sedimentos em suspensão durante eventos de chuva, na bacia do estudo.

## 6 DIFICULDADES ENCONTRADAS E RECOMENDAÇÕES

Em virtude de a pesquisa realizada ter diversas atividades de campo, muitas vezes o fator clima e tempo cronológico foram preponderantes para o êxito do trabalho. Durante a realização desse trabalho ocorreram algumas adversidades para o bom andamento e melhora no fator quantidade e qualidade dos dados obtidos. Para os dados coletados diretamente em campo observou-se que os eventos de cotas elevadas ocorriam geralmente no período noturno, inviabilizando sua aquisição. PAIVA (1997), MEHL (2000) afirmam que na cidade de Santa Maria 69% das precipitações ocorrem no período das 00:00 às 06:00h.

Além disso, o projeto previa a utilização do ADP (Acoustic Doppler Profile) como equipamento de medição da vazão. No entanto logo no início do projeto o aparelho apresentou um defeito na sonda, que teve que ser mandada ao fabricante para calibragem. A mesma retornou apenas em março de 2014. As medições foram então realizadas com o molinete fluviométrico, cujo método demanda mais tempo para obtenção dos resultados, e se tratando de uma bacia urbana, onde os picos de subida e descida acontecem rapidamente, muitas medições tiveram uma variação entre a cota inicial e final superior a 15 cm, dificultando a obtenção de amostras nos picos dos hidrogramas e sedimentogramas.

Por meio dos resultados obtidos durante as análises e das conclusões expostas, algumas recomendações são elencadas com a finalidade de aperfeiçoar outros estudos sobre sedimentos na bacia de estudo e em outras bacias urbanas. Recomenda-se que:

- Seja realizada a análise do estado das margens do Cadena, com a aplicação de metodologias que quantifiquem a erosão marginal, como a técnica dos pinos empregada nos trabalhos de Casado et al (2002) e Silva et al (2011);
- Se realizem estudos de identificação de fontes de sedimentos fluviais na bacia do presente trabalho, para que medidas que diminuam o assoreamento do Cadena sejam mais eficientes, uma vez que técnicas seriam aplicadas na origem da desagregação das partículas, e não com máquinas dragando o canal como é prática comum;

- Sejam realizados estudos para avaliar a qualidade dos sedimentos fluviais, uma vez que os poluentes e a matéria orgânica podem estar promovendo o enriquecimento dos sedimentos gerados por algum tipo de poluente inorgânico;
- A fim de considerar a variabilidade dos processos de acumulação e lavagem de poluentes, trabalhos *in-loco* de caracterização desses fenômenos devem ser realizados em diferentes usos de solo, a exemplo do estudo de Dotto et al. (2007);
- Estudos complementares da quantificação dos sedimentos na bacia do Cadena sejam realizados, para que se tenha um banco de dados abrangendo um maior período de tempo monitorado.

## REFERÊNCIAS

ALVES, D. B.; SAUSEN, T M.; LACRUZ, M. S. P. Modelagem dinâmica do escoamento superficial na área urbana de Santa Maria – RS. **Anais. XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto – SBSR**, Curitiba, 2011.

ARAÚJO, P. R.; GOLDENFUM, J. A.; TUCCI, C. E. M.. Avaliação de Pavimentos Permeáveis no Controle da Geração de Escoamento Superficial. In. XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos – Belo Horizonte, MG CD-ROM, 1999.

BARBOSA, M. S. Comparação de dois sistemas de retenção em um loteamento urbano em Porto Alegre – RS. Porto Alegre: UFRGS Programa de Pós-graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. **Dissertação (Mestrado)**, 1996.

BARROSO, D.G.; SILVA, M.L.N. Poluição e conservação dos recursos naturais: solo e água. **Informe agropecuário**, v.176, n.16, p. 17-24, 1992.

BARTELLI, G. Estudo do Transporte de Sedimentos em Suspensão na Bacia Hidrográfica do Arroio Garapiá – Maquiné-RS. **Monografia** (curso de Engenharia Ambiental), UNIVATES, 2012.

BERGER, M.G. Uso do sensoriamento remoto na hierarquização das áreas de risco ambiental na sub bacia hidrográfica do Arroio Cadena, Município de Santa Maria. 2001, p. 144. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Agrícola) – UFSM, Santa Maria, 2001.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. Conservação do solo. 5.ed. São Paulo: Ícone, p. 355, 2005.

BERTONI, J; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. Piracicaba, São Paulo: Ceres, p. 382, 1985.

BINDER, Walter. **Rios e Córregos, Preservar - Conservar - Renaturalizar: A Recuperação de Rios, Possibilidades e Limites da Engenharia Ambiental**. Rio de Janeiro: SEMADS,. 4ed, p.41, 2002.

BIRKINSHAW, S. J.; BATHURST, J. C. Model study of the relationship between sediment yield and river basin area. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 31, n. 6, p. 750-761, 2006.

BIRKINSHAW, S. J.; BATHURST, J. C. Model study of the relationship between sediment yield and river basin area. **Earth Surface Processes and Landforms**, v. 31, n. 6, p. 750-761, 2006.

BJÖRK, S. The Lago Paranoa Restoration Project. Brasília. **Project BRA-2000**. 45p. 1979

BLOSCHL, G.; SIVAPALAN, M. Scale issues in hydrological modelling: a review. v. 9. **Hydrological Processes**, p. 251-290, 1995.

BORDAS, M. P.; SEMMELMANN, F. R. Elementos de Engenharia de Sedimentos. In TUCCI, C. E. M. (org). **Hidrologia: Ciência e aplicação**. Porto Alegre: ABRH, 2008.

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 Água, II Simpósio de Recursos Hídricos Del Conosur**, Santa Fé: BRH Digital,v.3. p. 444-451, 1998.

BRASIL. Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica. **Guia de Práticas Sedimentométricas**. DNAEE, Brasília, 2000.

BRASIL. Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica. **Manual para Serviços de Hidrometria**. DNAEE, Brasília, 1977.

BRASINGTON, J.; RICHARDS, K. Turbidity and suspended sediment dynamics in small catchments in the Nepal Middle Hills. n. February. **Hydrological Processes**, p. 1448-1463, 2000.

BRAVARD, J. P.; PETIT, F. Lês cours d'eau – Dynamique du système fluvial. Armand. **Colin**, Paris, 2000.

BROOKES, A. Channelized Rivers: Perspectives for Environmental Management. **Wiley-Interscience**, p. 326, 1988.

BUTLER, D.; DAVIES, J. Urban Drainage. 3rd Ed. Londres: Spon Press, 625 p. 2010.

BUTZER, K. W. Book reviews: Chorley, R.J., Schumm, S.A. and Sugden, D.E. 1984: Geomorphology. London: Methuen. xviii + 605 pp. 17.95. **Progress in Physical Geography**, v. 10, n. 2, p. 292-293, 1984.

CAIADO, M.A.C. Inter-relações entre ambientes e qualidade das águas do Rio Itapemirim. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 1994.

CAMAPUM, J.C. *et al.* **Processos Erosivos no Centro Oeste Brasileiro**. Editora FINATEC, 2006.

CAPECHE, C. L.; et al. IN: Recuperação de áreas degradadas: a visão da Ciência do Solo no contexto do diagnóstico, manejo, indicadores de monitoramento e estratégias de recuperação / Sílvio Roberto de Lucena Tavares... [et al.]. - **Dados eletrônicos**. - Rio de Janeiro: Embrapa Solos, p. 105 – 132, 2008.

CAPPUYNS, V; SWENNEN, R. Kinetics of element release during combined oxidation and pHstat leaching of anoxic river sediments. **Applied Geochemistry**, v.20 p. 1169-1179, 2005.

CARDOSO, A. T. Estudo hidrossedimentológico em três bacias embutidas no município de Rio Negrinho – SC. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Ambiental) – UFSC, Florianópolis, p. 102, 2013.

CARVALHO, N. O. **Hidrossedimentologia Prática**. Rio de Janeiro: Interciência.2008.

CASADO, A.P.B. et al. Evolução do processo erosivo na margem direita do rio São Francisco (perímetro irrigado cotinguiba/Pindoba - SE). **R. Bras. Ci. Solo**,n.26, p.231-239, 2002.

CHOW, V.T. Handbook of Applied Hydrology, McGraw-Hill, New York, 1964.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia Fluvial**. São Paulo: Edgar Blucher Ltda, 1981.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. 2 ed. São Paulo: Edgard Blucher. 1980

CRAUL, P.J. Urban soils: Applications and practices. New York: John Wiley, p. 366, 1999.

CRISTO, S.V. de. O estudo de risco ambiental na sub-bacia hidrográfica do Arroio Cadena, direcionado à inundação. **Monografia** (Especialização em Interpretação de Imagens Orbitais e Sub-Orbitais), UFSM, Santa Maria, 2001.

DE BOER D.H.; CAMPBELL I.A. Spatial scale dependence of sediment dynamics in a semi-arid badland drainage basin. **Catena** 16: 277–290, 1989.

DENDY, F.E.; BOLTON, G.C. Sediment yield-runoff-drainage área relationships in the United States. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v.31, p.264-266, 1976.

DEPINE, H.; et al. Transporte de sedimentos em suspensão em áreas agrícolas em diferentes escalas espaciais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 16, p. 97-104, 2011.

DOTTO, C. B. S. et al. Acumulação e balanço de sedimentos em superfícies asfálticas em área urbana de Santa Maria - RS. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, p. 111-122, 2007.

DOTTO, C.B.S. Acumulação e Balanço de Sedimentos em Superfícies Asfálticas em Área Urbana de Santa Maria - RS. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2006.

DUVERT, C. et al. Towards prediction of suspended sediment yield from peak discharge in small erodible mountainous catchments (0.45–22km<sup>2</sup>) of France, Mexico and Spain. **Journal of Hydrology**, v. 454-455, p. 42-55, 2012.

ELLIOT, W. J.; WARD, A. D.; Soil Erosion and Control Practice. In: **Environmental Hydrology**. Lewis / CRC Press, Boca Raton, 462 p. Florida: 1995.

ERSKINE, W.D. Land use effects on sediment yields and soil loss rates in small basins of Triassic sandstone near Sydney, NSW, Australia. **Catena**, n. 49, p.271–287, 2002.

FLORENCE, P. L.; et al. Water quality index and correlation study for the assessment of water quality and its parameters of Yercaud Taluk, Salem District, Tamil Nadu, India. **Chemical Science Transactions**, v.1, n.1, p. 139-149, 2012.

GAO, P.; J., M. Temporal variations of suspended sediment transport in Oneida Creek watershed, central New York. **Journal of Hydrology**, v. 426-427, p. 17-27, 2012.

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

GORDON, N.D., et al. **Stream Hydrology: An Introduction for Ecologists**. Wiley, West Sussex – Inglaterra. 2ed. 446p, 2004.

GUSMÁN, G. T. N.; et al. Potential pollutant sources in a Choptank River (USA) subwatershed and the influence of land use and watershed characteristics. **Science of the Total Environment**, v.430, p. 270-279, 2012.

HASSAN, M. A.; CHURCH, M; YAN, Y.; SLAYMAKER, O. Spatial and temporal variation of in-reach suspended sediment dynamics along the mainstem of Changjiang (Yangtze River), China. **Water Resources Research**, v. 46, n. 11, p. W11551, 2010.

HUDSON, N.W. Soil conservation. Ithaca, Cornell University Press, p. 320, 1977.

IBGE; INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. BRASIL. **Censo 2010**. 2010. Disponível em: <<http://www.ibge.org.br/>>. Acesso em 12/10/ 2012.

JIONGXIN, X.; YUNXIA, Y. Scale effects on specific sediment yield in the Yellow River basin and geomorphological explanations. **Journal of Hydrology**, v. 307, n. 1-4, p. 219-232, 2005.

KELLER, E. A. Channelization: Environmental, Geomorphic, and Engineering Aspects. In: COATES, D. R. (Org.). **Geomorphology and Engineering**. London: Allen & Unwin, p. 21, 1979.

KELLER, E. A. **Hidrology and human use**. In: Environmental Geology, Charles E. Merrill Publishing Company, p. 230, 1981.

KIM, G.; YUR, J.; KIM, J. Diffuse pollution loading from urban stormwater runoff in Daejeon city, Korea. **Journal of Environmental Management**, v.85, p. 09-16, 2007.

KLEMES, V.I.T. Conceptualization and scale in hydrology. *Journal of Hydrology*, v. 65, 1983.

KNIGHTON, D. **Fluvial forms & processes – A New Perspective**. London: Arnold, 1998.

KONRAD, C.P. Effects of Urban Development on Floods U.S. Geological Survey. Fact Sheet, v. 3, p.76, 2003.

KUAI, K. Z.; TSAI, C. W. Identification of varying time scales in sediment transport using the Hilbert–Huang Transform method. **Journal of Hydrology**, v. 420-421, p. 245-254, 2012.

LELI, I.T. et al. Variabilidade temporal no transporte de sedimentos no rio Ivaí – Paraná (1977-2007). **Revista Brasileira de Geociências**. São Paulo – SP, v.41, n.4, 619-628p, 2011.

LENZI, M.A., MARCHI, L. Suspended sediment load during floods in a small stream of the Dolomites (northeastern Italy). **Catena**, v. 39, p. 267–282, 2000.

LIMA, J.E.F.W. et al. **Diagnóstico do fluxo de sedimentos em suspensão na bacia Araguaia-Tocantins**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados; Brasília, DF: ANA; ANEEL, 116p., 2003.

LIMA, J.E.F.W. et al. **Diagnóstico hidrossedimentológico da bacia do rio Piquiri**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2004.

LINSLEY, R.K.; KOHLER, M.A. Predicting the runoff from storm rainfall. U.S. Weather Bureau. **Research Paper 34**, 10p., 1951. Disponível em: <[http://docs.lib.noaa.gov/rescue/wb\\_researchpapers/QC852U55no34.pdf](http://docs.lib.noaa.gov/rescue/wb_researchpapers/QC852U55no34.pdf)> Acesso em: 04/12/2013.

MARTÍNEZ, L.; POLETO, C. Lead distribution by urban sediments on impermeable areas of Porto Alegre - RS, Brazil. **Journal of Urban and Environmental Engineering**, v. 4, n. 1, p. 1-8, 2010.

MARTÍNEZ, L.L.G. Distribuição de Poluição Difusa por Sedimentos Urbanos em Áreas Impermeáveis em Porto Alegre. 2010. 90 p. **Dissertação** (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – UFRGS/IPH, Porto Alegre, 2010.

MARTINS, F. B. et al. Zonamento Ambiental da Sub-Bacia Hidrográfica do Arroio Cadena, Santa Maria (RS) – (Estudo de Caso). Nota Técnica. **Revista Cerne**, Lavras, v. 11, n. 3, p. 315-322, 2005.

MEDEIROS, P. R. P. et al. Aporte fluvial e dispersão de matéria particulada em suspensão na zona costeira do rio São Francisco (SE/AL). **Geochimica Brasiliensis**, v. 21(2), p. 209-228, 2007.

MENDES, C. M.; et al. **Reflexões sobre impactos das inundações e propostas de políticas públicas mitigadoras**. São Carlos, SP, p. 17, 2004. Disponível em: < [http://www.eesc.usp.br/shs/downloads/technotes/emm/Mendes\\_de\\_Marco\\_Andrade\\_Souza\\_Macedo\\_SHS5874.pdf](http://www.eesc.usp.br/shs/downloads/technotes/emm/Mendes_de_Marco_Andrade_Souza_Macedo_SHS5874.pdf) > Acesso em: 10/04/2013.

MINELA, J.P.G.; MERTEN, G.H.; REICHERT, J.M; SANTOS, D,R,dos. Identificação e implicações para a conservação do solo das fontes de sedimentos em bacias Hidrográficas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.1637-1646, 2007.

MICHELON, C.R. Modelado do relevo em conformação do perfil das vertentes na microbacia do Arroio Cadena/ Santa Maria-RS, **Monografia** (especialização em Geografia), UFSM, Santa Maria, 2004.

MOTA, A.A. Tempo de concentração em pequena bacia experimental. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2012.

MULLER, A.C. **Hidrelétricas, Meio Ambiente e Desenvolvimento**. Makron Books. São Paulo. p. 412, 1995.

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).

NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A (Coords.). **Hidrologia Estatística**. Belo Horizonte: CPRM, 552 p. 2007.

NASCIMENTO, N. O.; HELLER, L. Ciência, tecnologia e inovação na interface entre as áreas de recursos hídricos e saneamento. **Rev. Bras. De Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 10, n. 1, p. 36-48, 2005.

NEARING, M.A. et al. Modeling response of soil erosion and runoff to changes in precipitation and cover. **Catena**, n. 61, p. 131–154, 2005.

OLIVEIRA, E. L. de A. Áreas de risco geomorfológico na bacia hidrográfica do Arroio Cadena, Santa Maria/RS: Zoneamento e Hierarquização. **Dissertação** (Mestrado em Geografia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2004.

OLIVEIRA, E. L. de A., RECKZIEGEL, B. W.; ROBAINA, L. E. de S. Modificações na morfologia dos canais de drenagem da bacia hidrográfica do Arroio Cadena, Santa Maria. UFPR. Curitiba, **Revista RAEGA**. n° 11, p. 103-113, 2006.

OLD, G.H. et al. The impact of a convectional summer rainfall event on river flow and fine sediment transport in a highly urbanized catchment: Bradford, West Yorkshire. **Science of the Total Environment**, p. 495–512, 2003.

ONO, Y. et al. Genotoxicity of substances extracted from construction materials. **Journal of Material Cycles and Waste Management**. v.2. n.1. p..38-42. 2000

ONU, U. N. P. F. State of World Population 2007: **Unleashing the Potential of Urban**. Growth. United Nations Population Fund, 2007. Disponível em: <<http://www.unfpa.org/public/home/publications/pid/408>>. Acesso em: 10/04/2013.

OSTROWSKY, M. S. B. Sistemática Integrada para Controlo de Inundações em Sub bacias Hidrográficas Urbanas. Estudo de Caso: A Bacia do Córrego Pirajuçara Sob o Enfoque da Integração de Obras com Ações de Educação e Percepção Ambiental In: XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Curitiba-PR, **CD-ROM**, 2003.

OWENS, P.; SLAYMAKER, O. Late Holocene sediment yields in small alpine and subalpine drainage basins , British Columbia. **Erosion, Debris flows and Environment in Mountain Regions**. n. 209, p. 147-154, 1992.

PAIVA, L.E D. de, et al. **Estimativa da vazão através da Curva-Chave para o Rio Paraibuna em Juiz de Fora (MG)**. ABRH, XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Maceió/ Al, 2011.

PARANHOS, R. M.; PAIVA, J. B. DE. Hydro-sedimentological monitoring in a small watershed: instrumentation and results. In: **VII IAHS Scientific Assembly**, Foz do Iguaçu. April, p. 4-9, 2005.

PEREIRA, M.D. et al. Hidrodinâmica e transporte de material particulado em suspensão sazonal em um estuário dominado por maré: Estuário de Caravelas (BA). **Revista Brasileira de Geofísica**, v.28, p.427-444, 2010.

PEREIRA, S. B.; PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D.; MATOS, A. T. Desprendimento e arraste do solo pelo escoamento superficial. *Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.7, n.3, p.423-429, 2003.

PIÃO, A.C.S. Transporte de nitrogênio, fosforo e sedimentos pelo ribeirão dos carrapatos (Município de Itaí – SP), sua relação com usos do solo e outros impactos antropogênicos e a sua deposição no braço do Taquari (represa de jurumirim). **Tese** (Doutorado em Engenharia Civil), São Carlos – USP. 1995.

PICOUET, C. et al. Empirical and conceptual modelling of the suspended sediment dynamics in a large tropical African river: the Upper Niger river basin. **Journal of Hydrology**, n. 250, p. 19–39, 2001.

POESEN, J. et al. Contribution of gully erosion to sediment production on cultivated lands and rangelands. In: Walling, D.E., Webb, B.W. (Eds.), **Erosion and Sediment Yield: Global and Regional Perspectives. IAHS Symposium**, vol. 236, p. 251 – 266. 1996.

POLETO, C. Alterações morfológicas em um canal fluvial urbano no contexto antrópico, social e ambiental: um estudo de caso. **Acta Scientiarum. Technology**. Maringá, v. 33, n. 4, p. 357-364, 2011.

POLETO, C. **Fontes potenciais e qualidade dos sedimentos fluviais em suspensão em ambiente urbano**. 2007. 137f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

POLETO, C; LAURENTI, A. **Sedimentos Urbanos e Corpos D'água**. In: Ambiente e Sedimentos. Porto Alebre, ABRH, p. 404, 2008.

POLETO, C.; MERTEN, G. H. Estudos de Zn e Ni em sedimentos fluviais em suspensão e o risco potencial aos recursos hídricos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.13, n.3, p. 147-154, 2008

POMPÊO, C. A., Drenagem Urbana Sustentável In: **Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre – RS**, vol 5, n.1 p.15-24, 2000.

PRICE, R. K.; VOJINOVIĆ, Z. **Urban Hydroinformatics: Data, Models and Decision Support for Integrated Urban Water Management**. IWA Publishing, 2010. Disponível em: < <http://books.google.com.br/books?id=pYPNHUdJvGkC> >. Acesso em: 10/04/2013.

RANKL, B. J. G. et al. Relations Between Total-Sediment Load and Peak Discharge for rainstorm Runoff on Five Ephemeral Streams in Wyoming U. S. Department of the interior. **Water Resources Investigations Report**, US Geological Survey, Reston, Virginia, 2004.

REGÜES, D. et al. Relación entre las tendencias temporales de producción y transporte de sedimentos y las condiciones climáticas en una pequeña cuenca de montaña mediterránea (Vallcebre, Pirineos Orientales). **Cuadernos de Investigación Geográfica** v. 26, p. 41–65, 2000

REIS, J. T. Influência do Uso e Ocupação da Terra no Ecossistema Aquático da Sub-Bacia Hidrográfica do Arroio Cadena, em Santa Maria – RS. **Dissertação** (Mestrado em Geomática). UFSM, 2006.

RESTREPO, J. **Los sedimentos Del rio Magdalena: Reflejo de la crisis ambiental**. Colômbia: Universidad EAFIT, 2005.

RESTREPO, J. D. et al. Factors controlling sediment yield in a major South American drainage basin: the Magdalena River, Colombia. **Journal of Hydrology**, v. 316, n. 1-4, p. 213-232, 2006.

RICHARDS, K. S. Rivers: Forms and processes in alluvial channels. London and New York: **Methuen**, 1982.

RIGHS, A. A; DA SILVA, R. F. **Água e Educação** – Princípios e Estratégias de Uso e Conservação. Santa Maria, RS: Centro Universitário Franciscano, p. 155, 2009.

ROBAINA, L.E. et al. Análise dos ambientes urbanos de risco do município de Santa Maria – RS. **Ciência & Natura**, Santa Maria, v.23, p. 139-152, 2001.

SANTORO, J. **Desastres naturais: conhecer para prevenir**. Lídia Keiko Tominaga, Jair Santoro, Rosângela do Amaral (orgs.). São Paulo : Instituto Geológico, p. 60, 2009.

SANTOS, I. et al. **Hidrometria Aplicada**. Porto Alegre: ABRH, 2001.

SCAPIN, J. Caracterização do Transporte de Sedimentos em um Pequeno Rio Urbano na Cidade de Santa Maria – RS. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2005.

SEA (SECRETARIA ESTADUAL DO AMBIENTE). Rios e Córregos: Preservar – Conservar – Renaturalizar. Rio de Janeiro: Estado do Rio de Janeiro. 2001.

SILVA, C. G.; et al. Atributos físicos, químicos e erosão hídrica em entressulcos sob chuva simulada, em sistema de plantio direto e convencional. *Engenharia Agrícola*, v.25, n.1, p.144-153, 2005.

SEEGER, M. et al. Catchment soil moisture and rainfall characteristics as determinant factors for discharge/suspended sediment hysteretic loops in a small headwater catchment in the Spanish Pyrenees. **Journal of Hydrology**, n. 288, p. 299–311, 2004.

SILVA, A. et al. Erosão marginal e sedimentação no rio Paraguai no município de Cáceres (MT). **Revista brasileira de Geociências**, n.41, p.76-84, 2011.

SILVA, C.E., et al. Degradação da qualidade da água no meio urbano. **XII Simpósio Luso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**. Figueira da Foz, Portugal, 2006.

SILVEIRA, A. L. L, Hidrologia Urbana no Brasil. In: Drenagem Urbana – Gerenciamento, Simulação e Controle / Org. BRAGA, B.; TUCCI, C. E. M.; TOZZI, M., Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS/ABRH, 1998.

SOLER, M. et al. Relationships between suspended sediment concentrations and discharge in two small research basins in a mountainous Mediterranean area (Vallcebre, Eastern Pyrenees). **Geomorphology**, v. 98, n. 1-2, p. 143-152, 2008.

SOUZA, W.F.L, et al. Impactos de Barragens sobre os Fluxos de Materiais na Interface Continente-Oceano. **Rev. Virtual Quim.** v.3 (2), p.116-128, 2011.

STEDINGER, J. R. Fitting log normal distributions to hydrologic data. **Water Resources Research**, vol. 16, p. 481–490, 1980. Disponível em: <<http://www.cee.mtu.edu/~vgriffis/CE%205620%20materials/CE5620%20Reading/Stedinger%201980-Fitting%20Lognormal.pdf>> Acesso em: 04/12/2013.

SUN, H. et al. Turbidity-based erosion estimation in a catchment in South Australia. **Journal of Hydrology**, n. 253, p. 227–238, 2001.

TOY, E. E. Análise dos Processos Erosivos no Município de Sarandi/PR. 2010. p. 32 **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Urbana) – Universidade Estadual de Maringá. Maringá. 2010.

TUCCI, C.E.M. Drenagem Urbana. **Ciência e Cultura**. São Paulo. vol.55 no.4, p. 36-37, 2003.

TUCCI, C. E. M. Águas Urbanas. In: TUCCI, C. E. M.; BERTONI, J. C. (org). **Inundações urbanas na América do Sul**. Porto Alegre: ABRH, 2008.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia – Ciência e aplicação**. Porto Alegre: UFRGS, ABRH, 4 ed. 2012.

TUCCI, C.E.M. **Drenagem Urbana**. Porto Alegre: ABRH. v.5, 1995.

USDA-NRCS. Urban soil compaction. Urban Technical. v.2 p 1-4, 2000: Disponível em: <[http://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE\\_DOCUMENTS/nrcs142p2\\_053278.pdf](http://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_053278.pdf)> Acesso em 12/05/2012.

USGS (U.S. Geological Survey). **Effects of Urban Development on Floods**. Fact Sheet. 2003. Disponível em: <<http://water.usgs.gov>> Acesso em: 12/05/2012.

UWE. UNIVERSITY OF THE WEST OF ENGLAND. **Pearson's Correlation Coefficient, (r)**. 2012. Disponível em: <<http://hsc.uwe.ac.uk/dataanalysis/quantInfAssPear.asp>>. Acesso em: 13 nov. 2013.

VAZ, C. A. B. Diagnóstico da Qualidade Ambiental em Bacia Hidrográfica Urbana. Estudo de caso – A sub-bacia do Arroio Cadena Santa Maria – RS. **Dissertação** (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria. 2009.

VERGOTTI, M. et al. Influência da matéria orgânica na adsorção de Hg e outros elementos em sedimentos de lagos da bacia do rio Madeira (RO). **Geochimica Brasiliensis**, v.23(1), p. 91-100, 2009.

VERSTRAETEN, G., POESEN, J. Factors controlling sediment yield from small intensively cultivated catchments in a temperate humid climate. **Geomorphology**, v. 40, p. 123–144, 2001.

WALLING, D.E. The sediment delivery problem. *Journal of Hydrology*.69,209-237, 1983.

ZABALETA, A. et al. Factors controlling suspended sediment yield during runoff events in small headwater catchments of the Basque Country. **Catena**, v. 71, n. 1, p. 179-190, 2007.



## Anexo A – Tabela utilizada para o cálculo da Css pelo ensaio da evaporação

<u>Evaporação</u>					
Rio: VM		Método de medição:			
Local: Ar. Só		Tipo:			
		Medição:			
		Coleta:			
		Amostragem:			
		Data:		Op.:	
<u>Controle de recepção</u>					
frasco	água+sedim.+tara (g)	sulf. cobre (ml)	tara (g) (g)	água + sedim. total (g)	
Ar So					
				ásed	
<u>Decantações, reduções e volume</u>					
<u>1ª decantação</u>		<u>1ª redução</u>	<u>2ª decantação</u>		<u>volume reduzido - vr</u>
frasco:	-	(béquer 4000ml n°)	béquer 1000 ml n°:	1	(ml)
início:			início:		
final:			final:		
tempo (dias):			tempo (dias):		
<u>Sólidos dissolvidos inicial - sd (50 ml)</u>					
cápsula	água+sól.dis.+tara (g)	tara (g)	água + sólidos dissolvidos (g)	conc. sól. dissolvidos (mg/l)	
102					
105					
Sólidos dissolvidos média - sdg:			#DIV/0!	(sdg*1000)/(50/1000)	
<u>Colóide</u>					
béquer (1000 ml)	água+colóide+tara (g)	tara (g)	água + colóide - (ác) (g)	colóide total (clg) (g)	
				ásed*clp / ácl	
cadinho	colóide + tara (g)	tara (g)	colóide - (clp) (g)	conc. de colóide (mg/l)	
				(clp*1000)/(ác/1000)	
<u>Evaporação</u>					
béquer n.º	béquer + sedimento (g)	tara do béquer (g)	sedimento (g)	sedim. total (sed) (g)	
007					

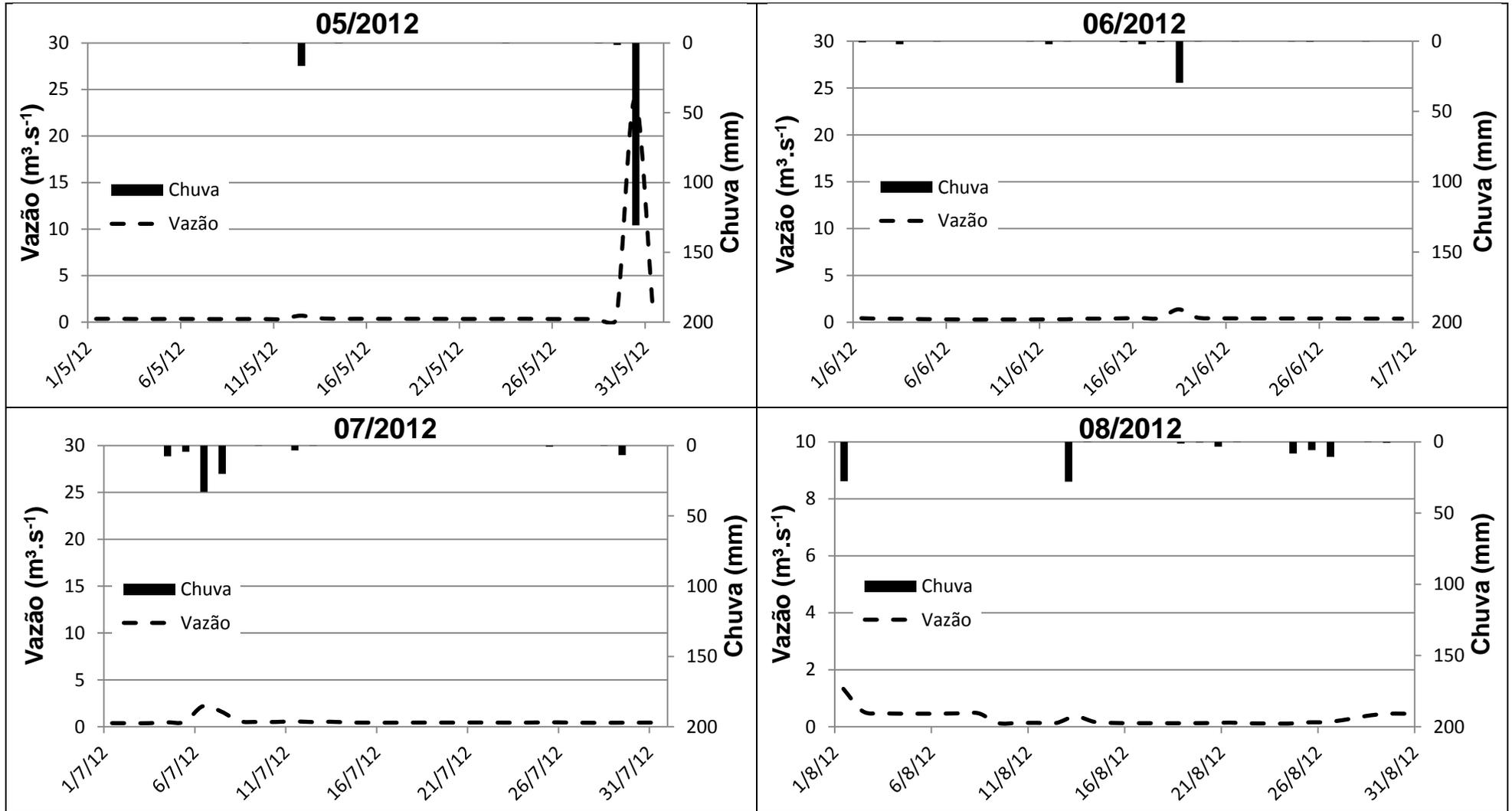
Concentração =  mg/l

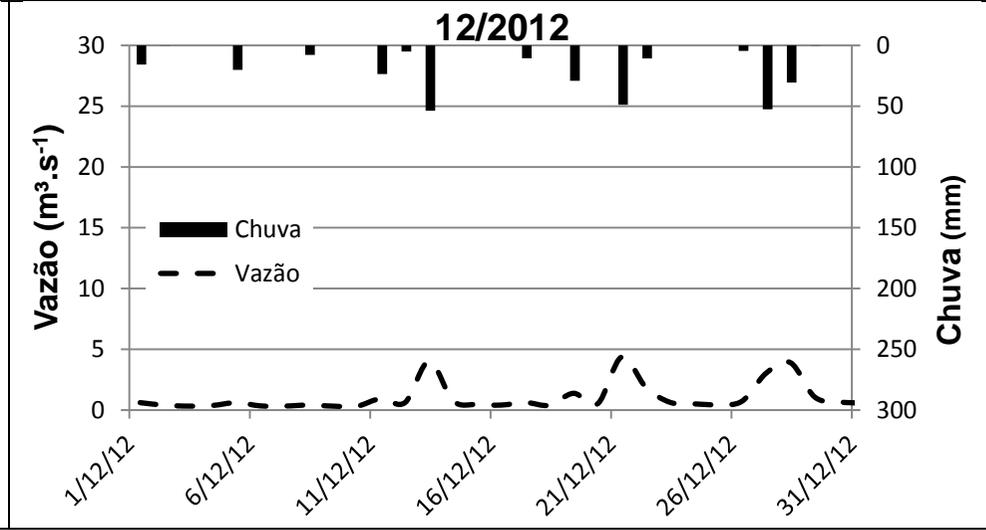
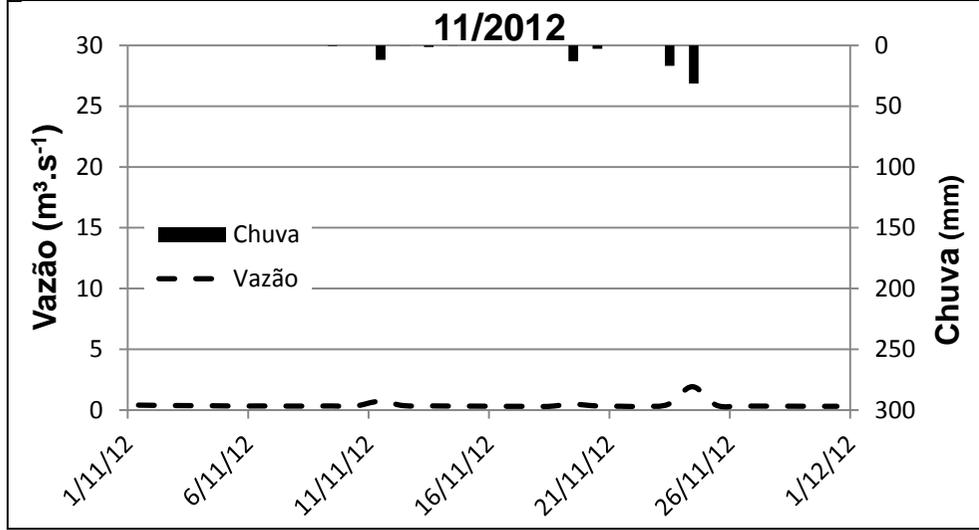
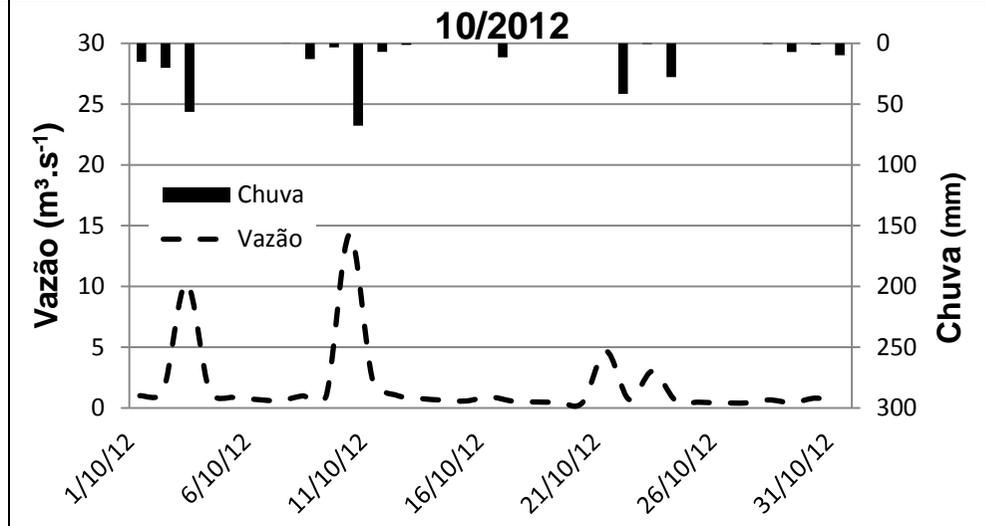
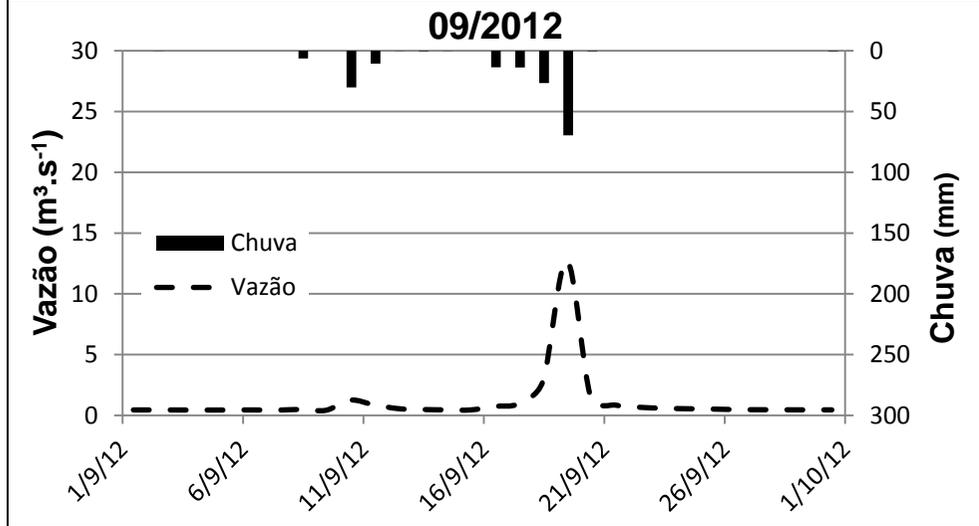
Filtração:  $sed+clg-(clg*vr/ásed)/ásed*1000.000$

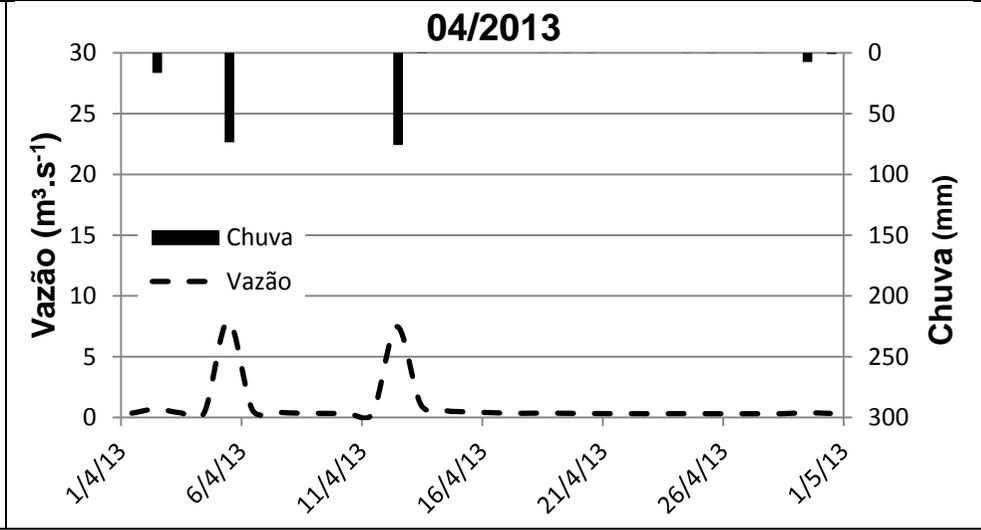
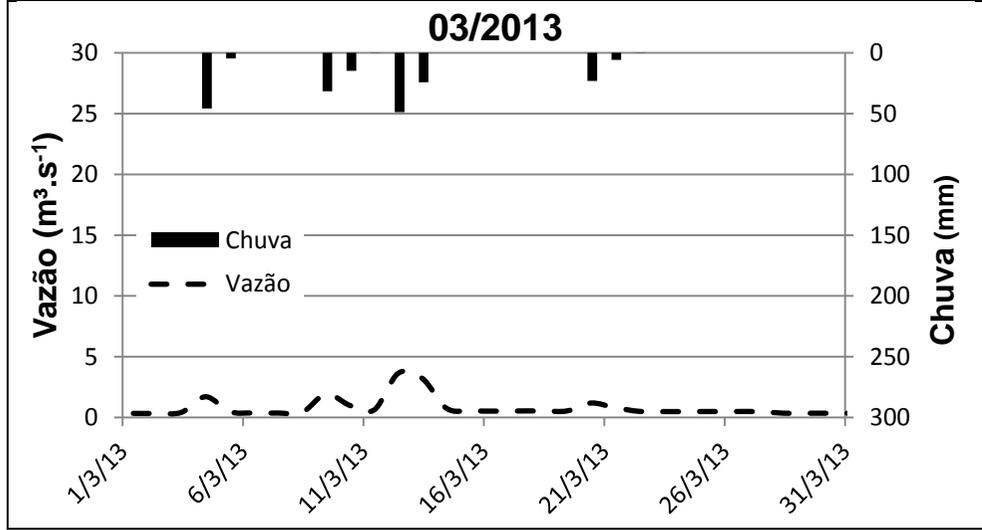
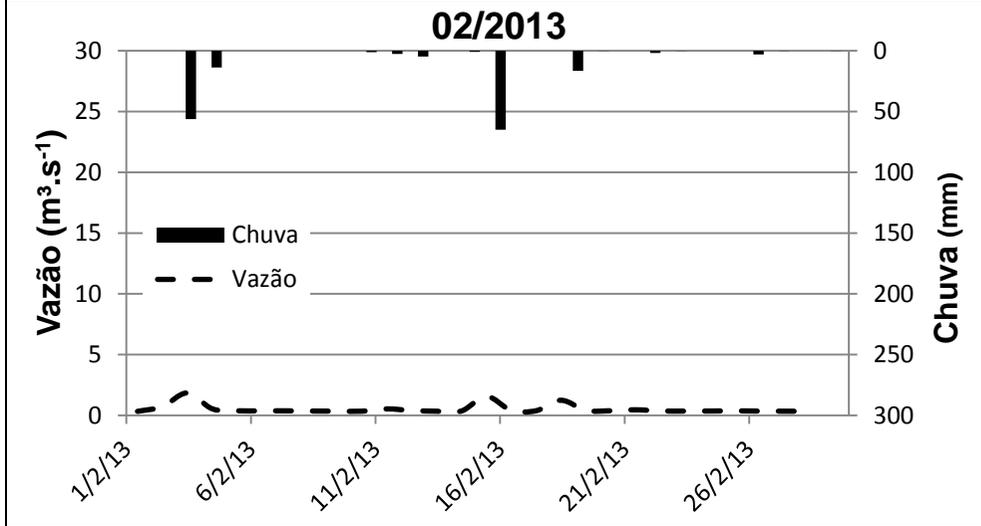
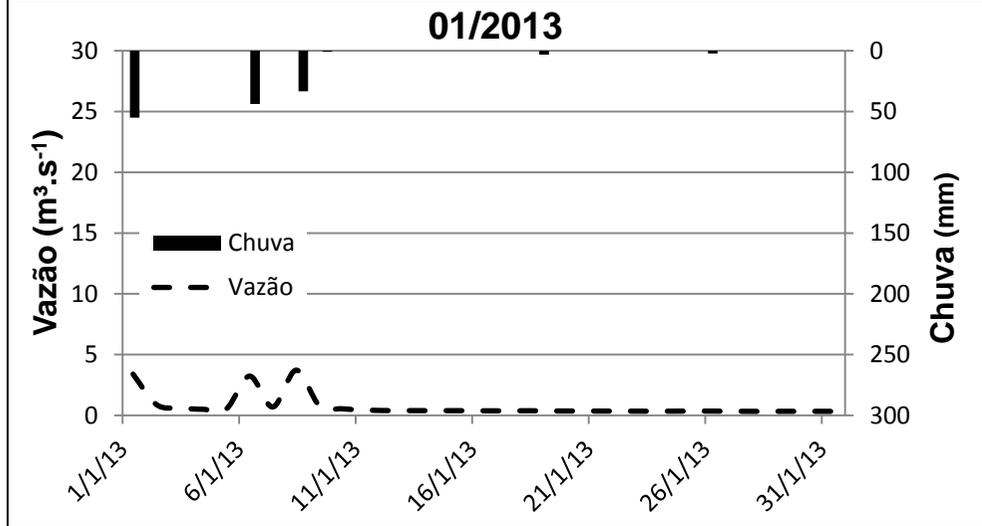
Evaporação:  $sed+clg-(clg*vr/ásed)-(sdg*vr/50)/ásed*1000.000$

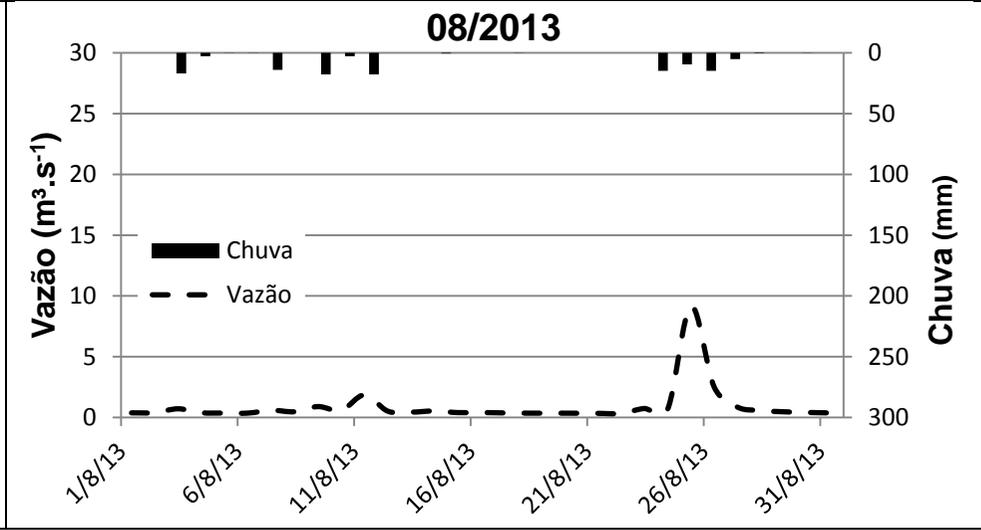
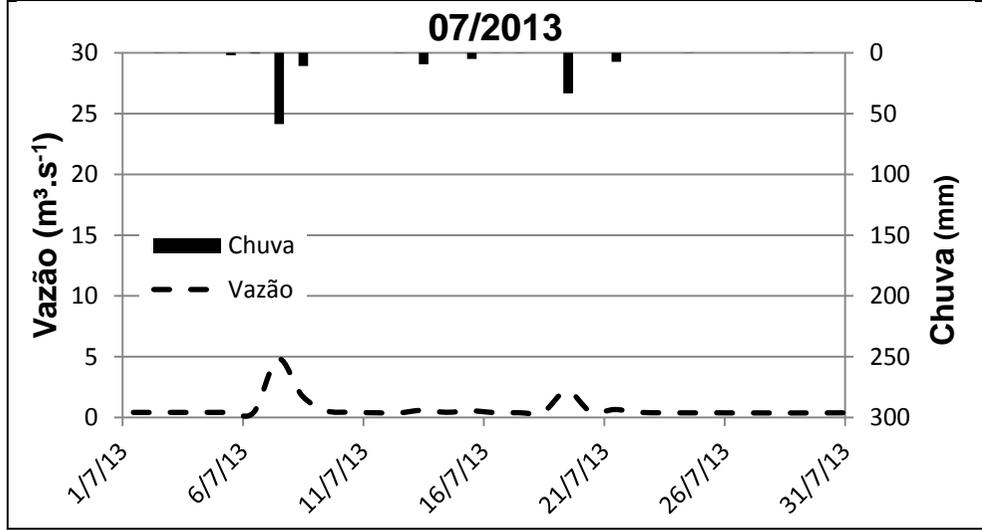
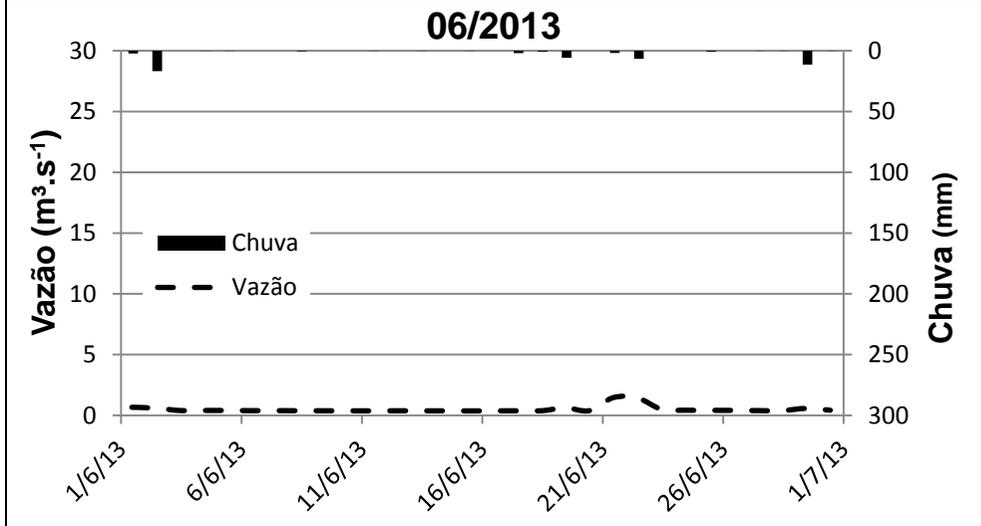
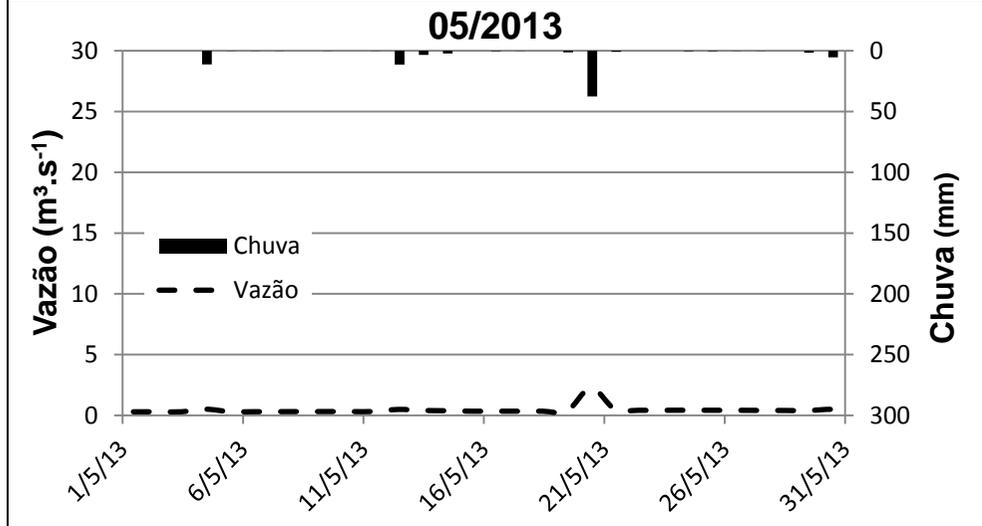


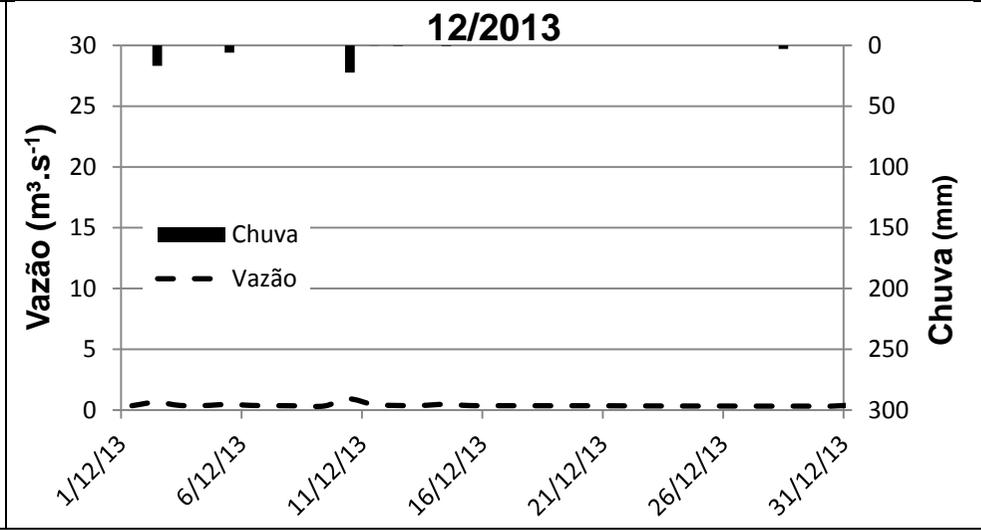
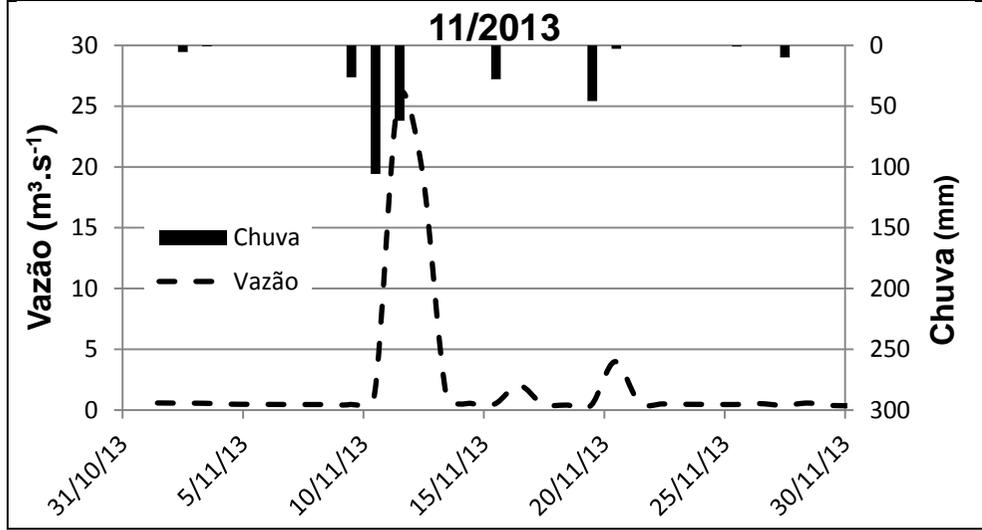
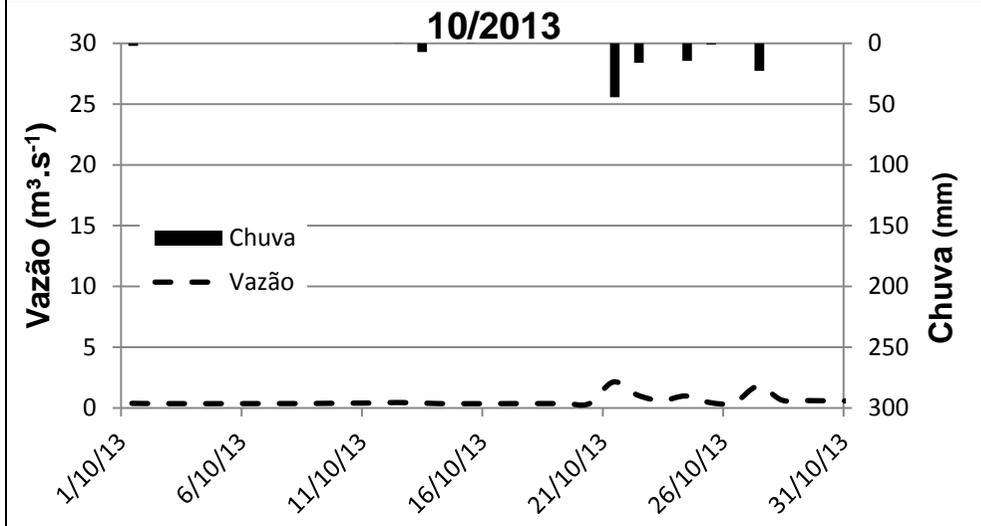
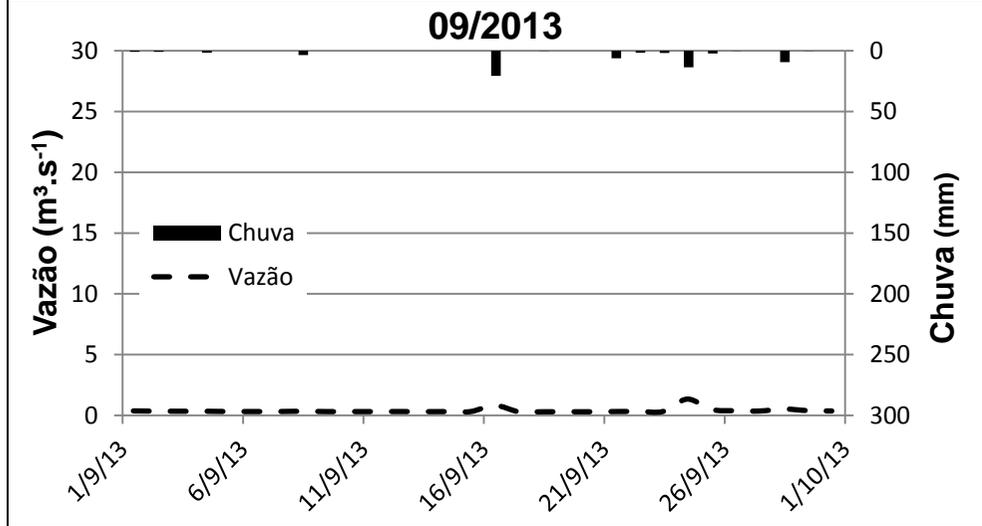
Apêndice A – Hidrogramas mensais do período estudado.

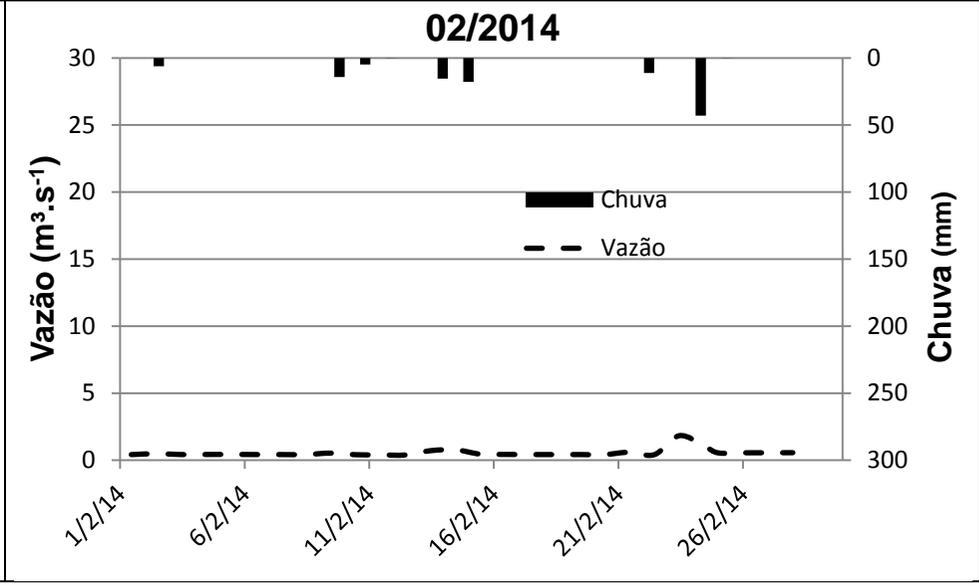
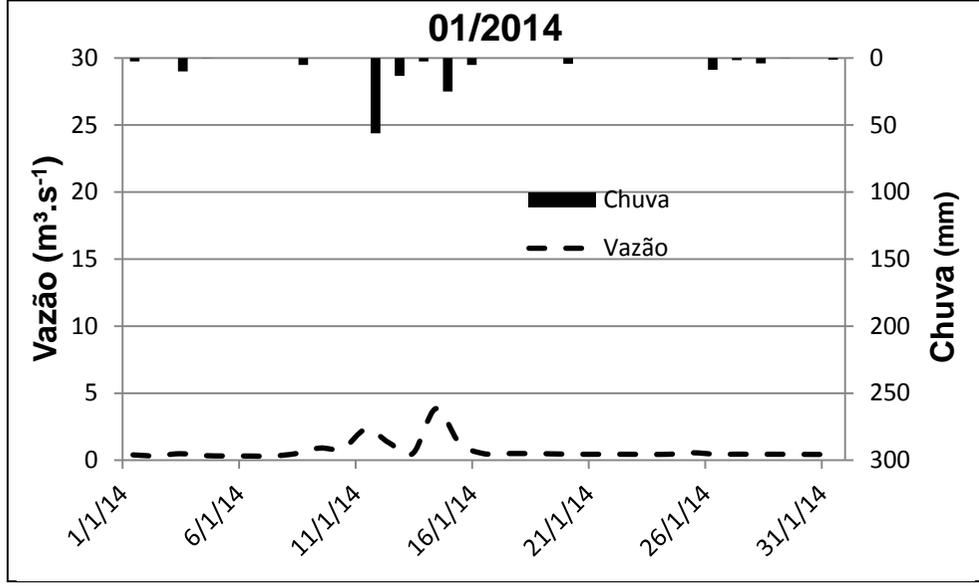




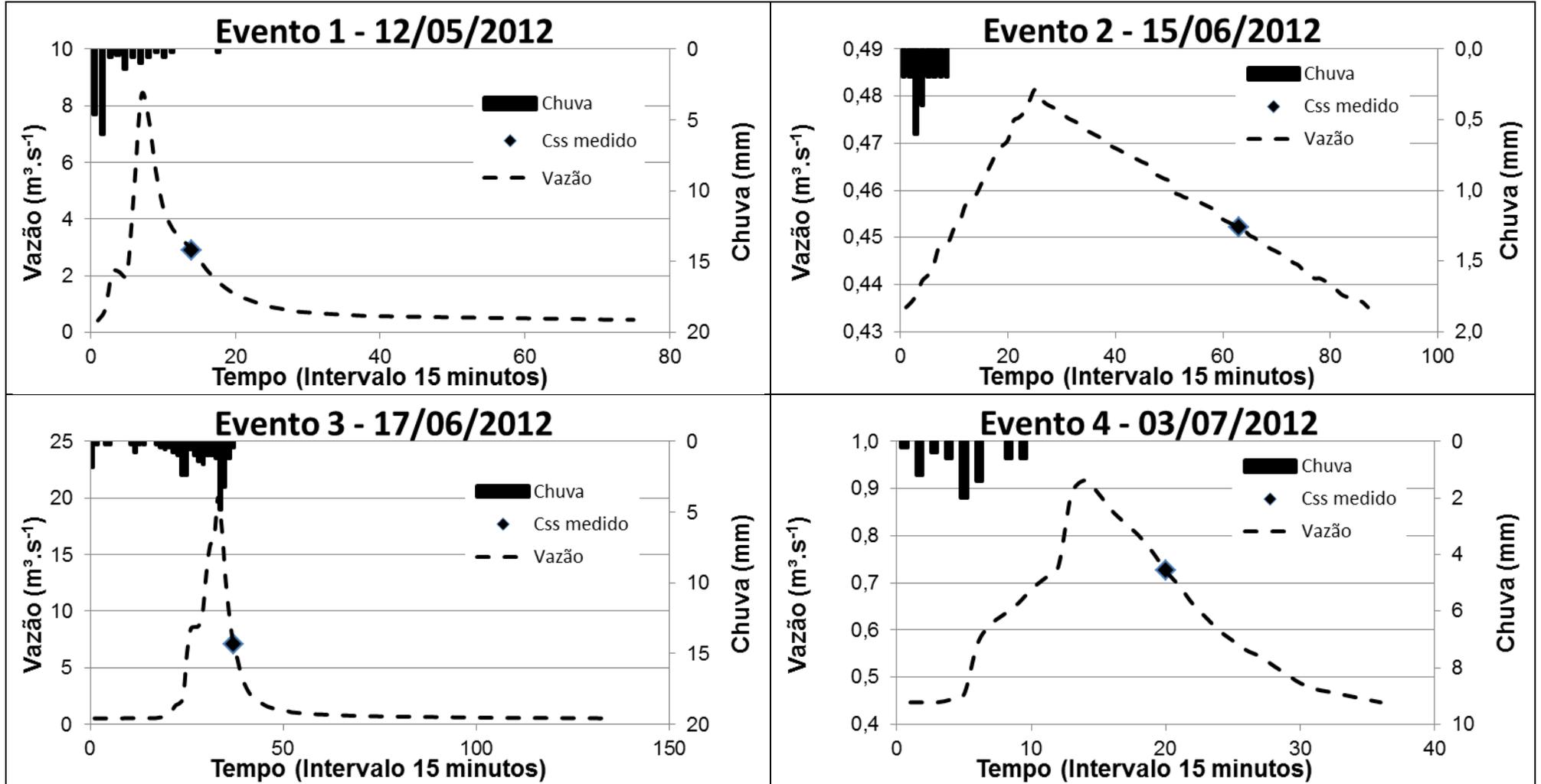


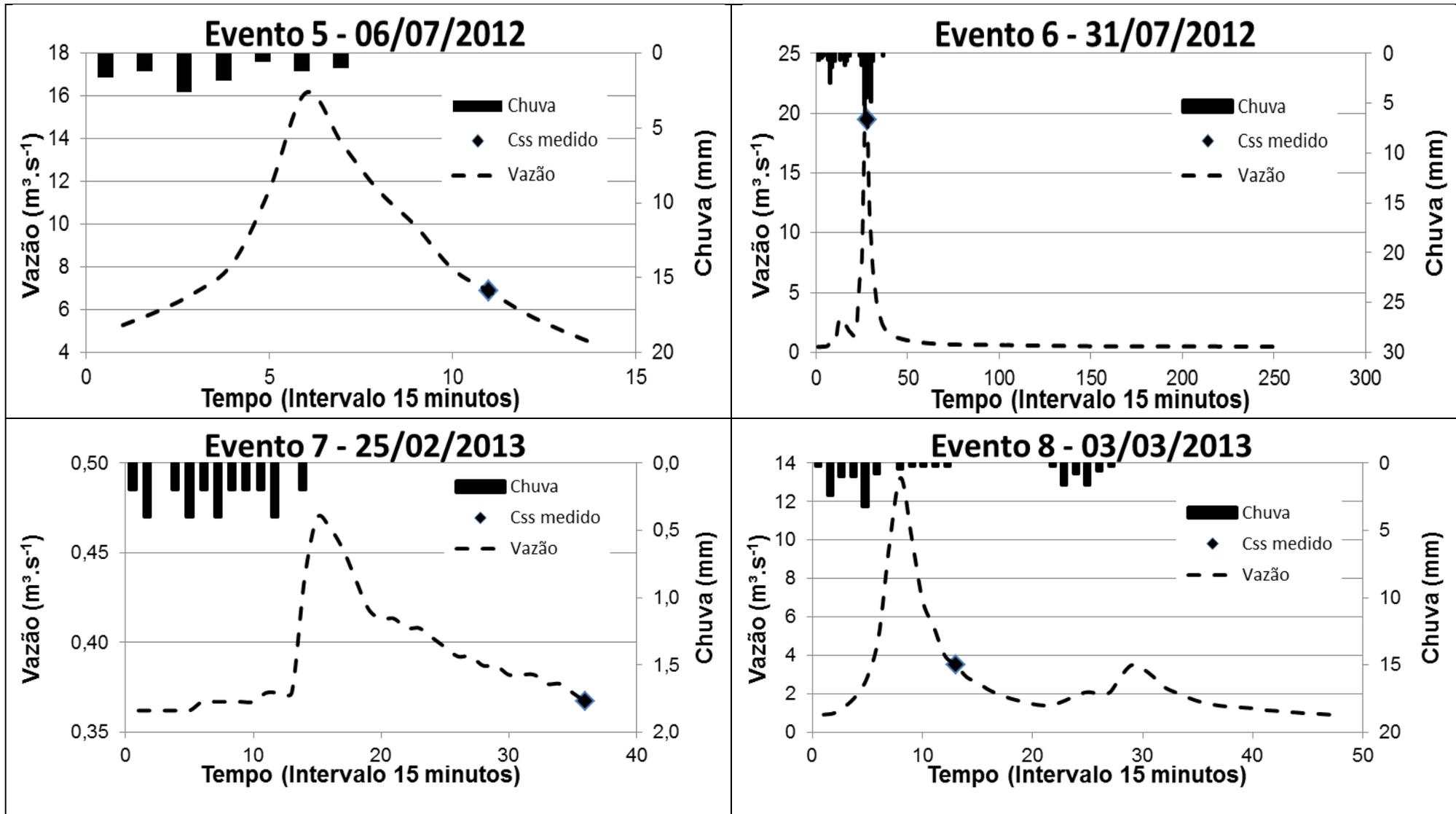


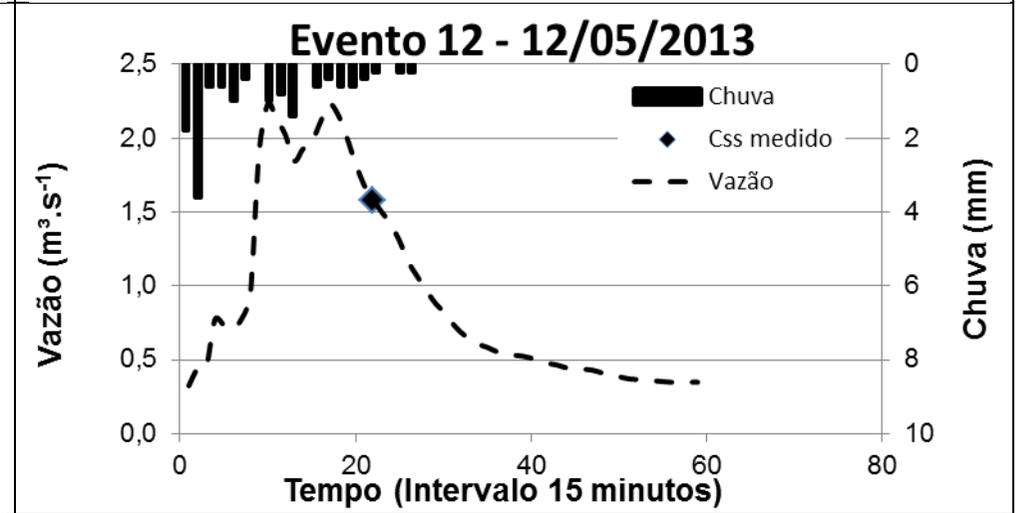
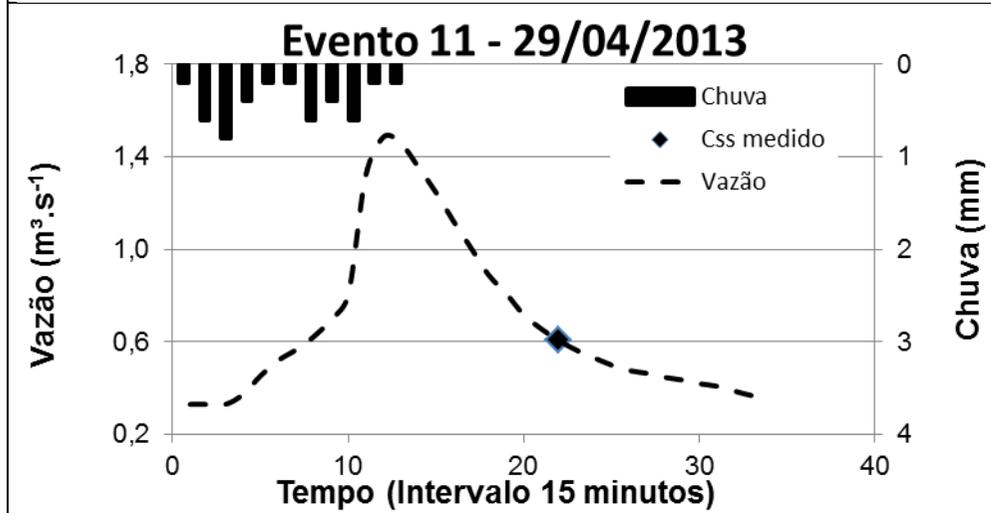
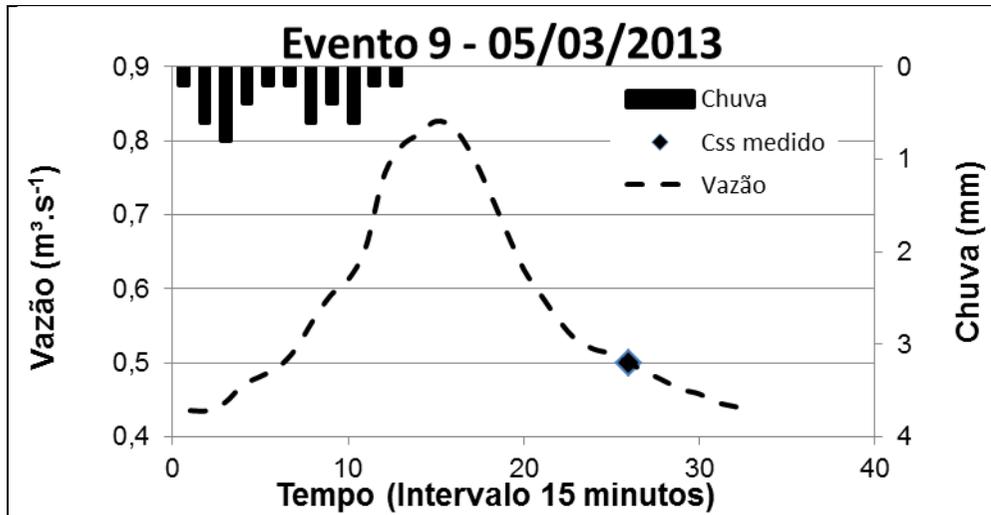


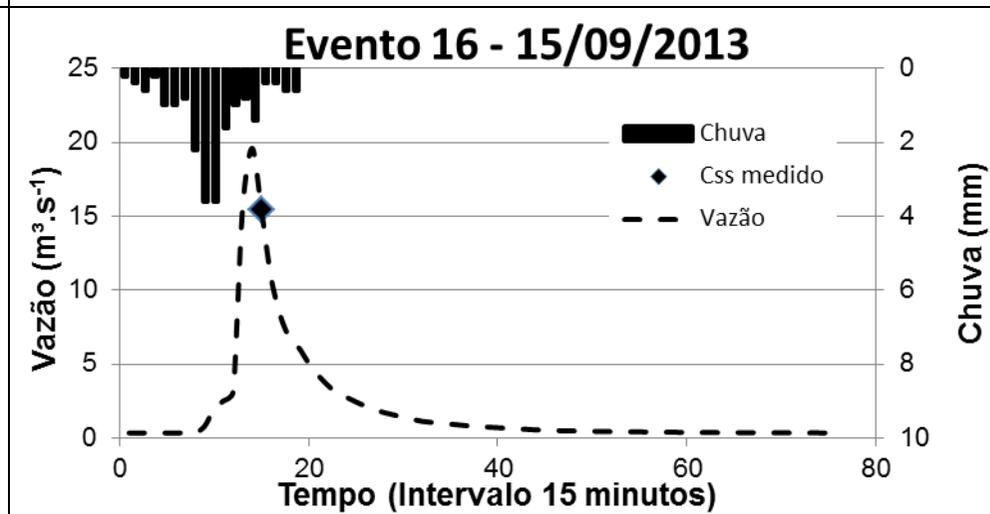
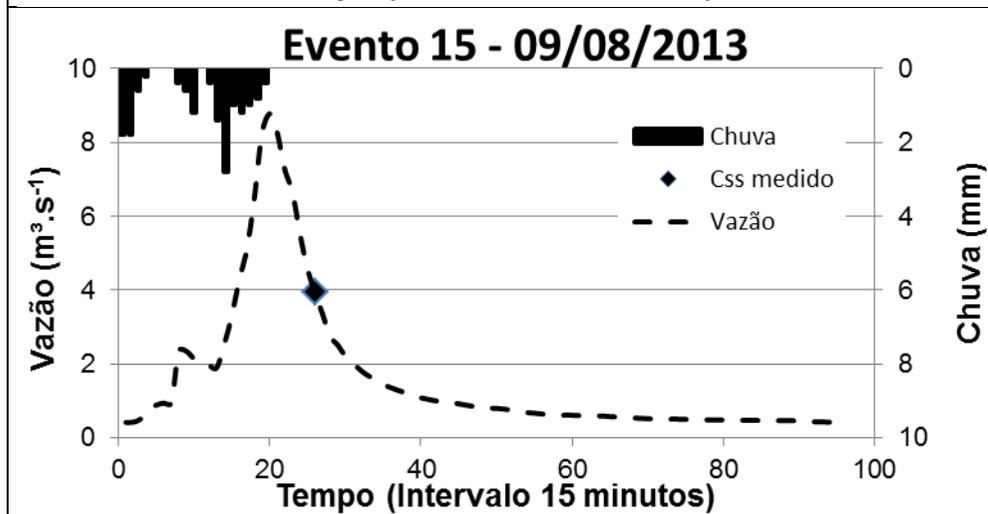
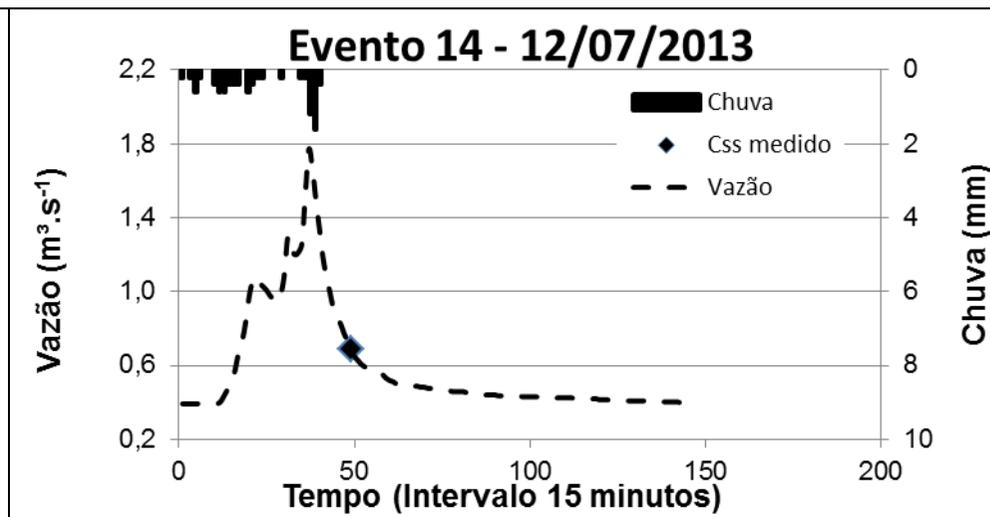
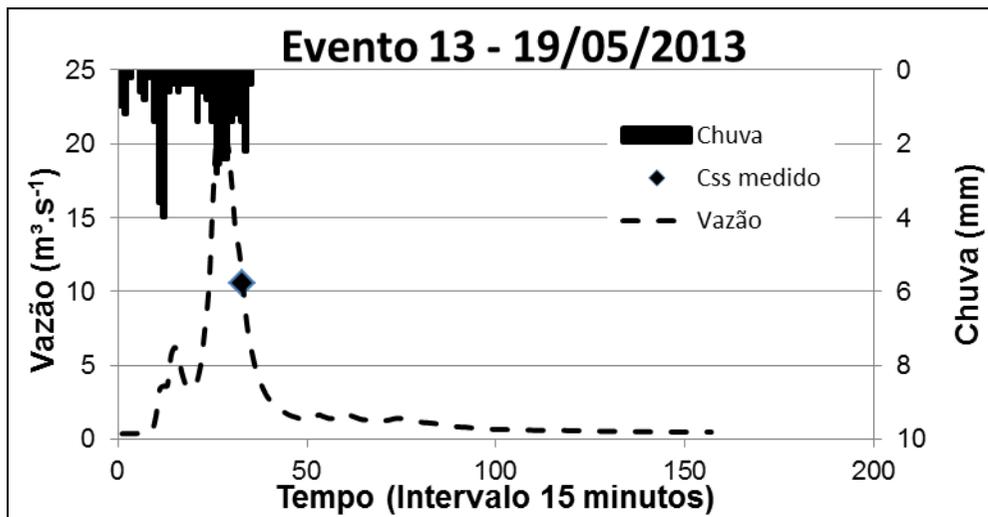


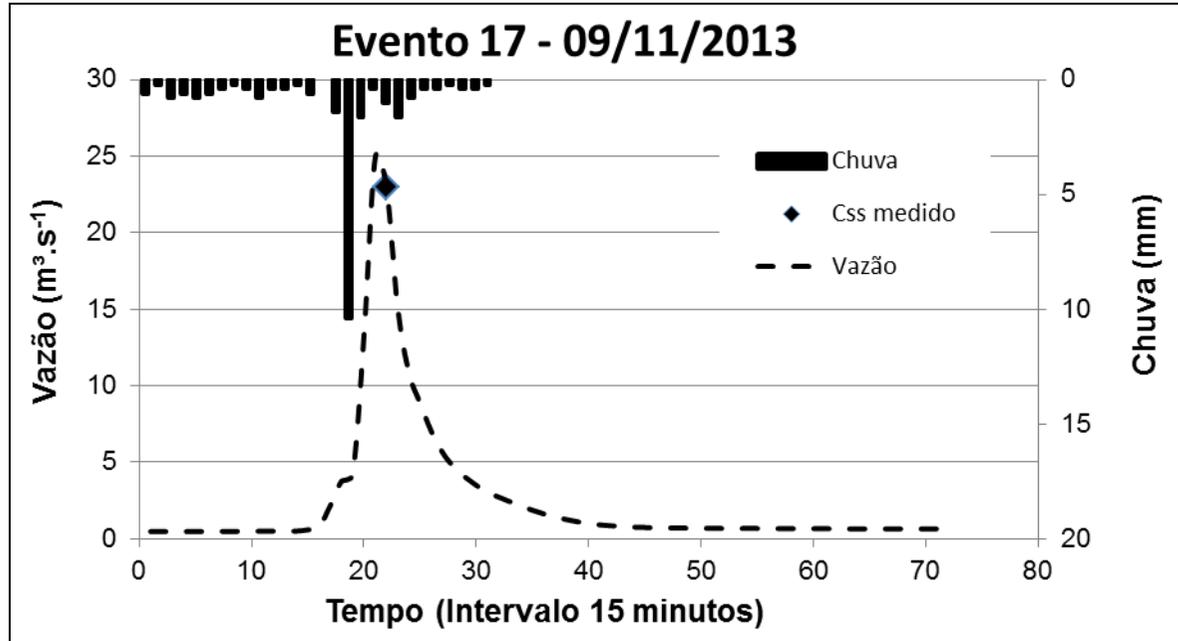
Apêndice B – Hidrogramas e Css medidos dos eventos monitorados.













**Apêndice C – Matriz de correlação linear de Pearson para os dados da Bacia.**

	Q <sub>a</sub>	Q <sub>a1</sub>	API <sub>5</sub>	API <sub>3</sub>	AP <sub>1</sub>	Pt	tP	IP	Q <sub>sup</sub>	TiQ	Q <sub>máx</sub>	Q <sub>méd</sub>	CSS <sub>medida</sub>
Q <sub>a</sub>	1,00	<b>0,83</b>	<b>0,67</b>	<b>0,69</b>	<b>0,62</b>	-0,13	-0,38	-0,13	-0,14	<b>0,58</b>	0,19	<b>0,93</b>	-0,04
Q <sub>a1</sub>		1,00	<b>0,92</b>	<b>0,91</b>	<b>0,93</b>	-0,24	-0,45	-0,26	-0,25	<b>0,49</b>	0,08	<b>0,78</b>	-0,14
API <sub>5</sub>			1,00	<b>0,99</b>	<b>0,92</b>	-0,30	-0,44	-0,33	-0,28	0,37	-0,02	<b>0,62</b>	-0,24
API <sub>3</sub>				1,00	<b>0,91</b>	-0,28	-0,46	-0,31	-0,28	0,41	0,00	<b>0,64</b>	-0,22
AP <sub>1</sub>					1,00	-0,23	-0,49	-0,29	-0,26	0,47	0,04	<b>0,62</b>	-0,18
Pt						1,00	<b>0,50</b>	<b>0,99</b>	<b>0,95</b>	0,43	<b>0,88</b>	0,17	<b>0,77</b>
tP							1,00	<b>0,56</b>	<b>0,60</b>	-0,33	0,34	-0,30	0,37
IP								1,00	<b>0,96</b>	0,37	<b>0,86</b>	0,15	<b>0,76</b>
Q <sub>sup</sub>									1,00	0,33	<b>0,82</b>	0,15	<b>0,70</b>
TiQ										1,00	<b>0,71</b>	<b>0,78</b>	<b>0,51</b>
Q <sub>máx</sub>											1,00	0,48	<b>0,90</b>
Q <sub>méd</sub>												1,00	0,23
CSS <sub>medida</sub>													1,00

\* Os dados destacados em negrito são aqueles significativos ( $p < 0,05$ ).