

**LUCIANA INÁCIO PAULETTI**

**ACÚMULO E CARREAMENTO DE POLUENTES EM SUPERFÍCIE DE  
ESTACIONAMENTO**

Goiânia/GO  
- Agosto, 2012 -

**LUCIANA INÁCIO PAULETTI**

**ACÚMULO E CARREAMENTO DE POLUENTES EM SUPERFÍCIE DE  
ESTACIONAMENTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia do Meio Ambiente da Universidade Federal de Goiás, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia do Meio Ambiente.

**Área de Concentração:** Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental.

**Orientador:** Prof. Dr. Eduardo Queija de Siqueira.

Goiânia/GO  
- Agosto, 2012 -

**LUCIANA INÁCIO PAULETTI**

**ACÚMULO E CARREAMENTO DE POLUENTES EM SUPERFÍCIE DE  
ESTACIONAMENTO**

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Engenharia do Meio Ambiente no Programa de Pós-Graduação *Stricto Sensu* em Engenharia do Meio Ambiente da Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás, aprovada em 21 de setembro de 2012 pela seguinte Banca Examinadora:

---

**Prof. Dr. Eduardo Queija de Siqueira – UFG**  
Presidente da Banca

---

**Prof. Dra. Kátia Alcione Kopp – UFG**  
Examinador Interno

---

**Prof. Dr. Cícero Onofre de Andrade Neto – UFRN**  
Examinador Externo

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus, por ter me dado forças e capacidade para essa realização, pelo apoio nos momentos de fraqueza e pelo amor sem limites.

Ao professor Eduardo Queija de Siqueira, pela orientação cuidadosa, pelo incentivo, disposição, confiança e amizade, por ter contribuído para o meu crescimento pessoal e profissional e por todas as oportunidades proporcionadas à minha pessoa.

Aos professores Cícero Onofre de Andrade Neto e Kátia Alcione Kopp, pela atenção e disponibilidade, aceitando, gentilmente, compor a banca avaliadora, auxiliando na conclusão deste trabalho.

Aos professores do PPGEMA, pela dedicação e competência na transmissão dos conhecimentos durante o curso.

À EEC – UFG, pela oportunidade de realização da pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq pela concessão da bolsa de estudos.

Aos colegas, pela amizade, colaboração e apoio em todos os momentos, em especial à Fernanda e Gabriela.

Aos colegas Silvio e Thiago, pela amizade, apoio e contribuições ao trabalho.

Aos funcionários do Laboratório Aqualit, pelo auxílio na realização das análises de água.

Agradecimento especial ao Wanderlei, pelo carinho, dedicação, competência e apoio durante a realização do trabalho.

Ao Marcelo, pelo amor e companheirismo, por estar ao meu lado em todos os momentos alegres e tristes e por contribuir para essa conquista.

À Marli, pelo carinho, esforço e compreensão, assumindo um papel de mãe incontestável, com tanto amor e dedicação, sempre presente com uma força inexplicável.

Aos meus pais (*in memorium*), tutores do meu ser e base do meu saber, sempre vivos em meu coração.

Em especial, ao Fabrício, pelo amor incomparável, pelo carinho, confiança e dedicação, pelo incentivo e apoio de sempre e por compartilhar todas as minhas dificuldades, meus sonhos e minhas conquistas.

Enfim, à todas as pessoas que me acompanharam nessa jornada, em diferentes momentos, e que contribuíram para a concretização deste sonho com palavras de incentivo e amizade.

À todos, meus sinceros agradecimentos.

“Apesar dos nossos defeitos, precisamos enxergar que somos pérolas únicas no teatro da vida e entender que não existem pessoas de sucesso e pessoas fracassadas. O que existem são pessoas que lutam pelos seus sonhos ou desistem deles”.

Augusto Cury

## RESUMO

PAULETTI, L.I. **Acúmulo e carreamento de poluentes em superfície de estacionamento.** Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, 2012.

O presente trabalho teve como objetivo quantificar o acúmulo (build-up) e carreamento (wash-off) de poluentes, principalmente metais, na água do escoamento de uma superfície pavimentada urbana de Goiânia. Os estudos para estimativa dos processos de build-up e wash-off são ainda insipientes no Brasil. Foram avaliadas doze parcelas experimentais asfaltadas, com dimensão de  $3\text{m}^2$ , situadas em um estacionamento público, onde foram realizadas as determinações de build-up e wash-off nos meses de junho e julho de 2012. Para wash-off foi utilizado um simulador de chuvas em três intensidades, 69 mm/h, 109 mm/h e 180 mm/h. A quantificação do acúmulo nas superfícies amostradas determinou a carga por  $\text{m}^2$  para obtenção do coeficiente de build-up, bem como para a análise da influência dos dias secos antecedentes antes das campanhas amostrais. O build-up foi ajustado nas quatro equações: (1)Linear, (2)Potencial, (3)Exponencial, e (4)Michaelis-Menton, com a qual se obteve o melhor ajuste. As análises de qualidade de água de escoamento permitiram o cálculo da Concentração Média do Evento (CME), construção de polutogramas, determinação do coeficiente de wash-off e análises de correlação. A taxa de acúmulo obtida foi, em média, de  $8,53\text{g}/\text{m}^2\text{dia}$ , sendo que quanto mais dias secos antecedentes à coleta, maior o acúmulo de poluentes. Foram encontrados metais (cromo, cádmio, cobre, chumbo, níquel, zinco, manganês e ferro) em todas as parcelas experimentais para todos os eventos simulados nos diferentes períodos. Verificou-se correlação direta e acentuada entre as variáveis avaliadas, principalmente entre sólidos suspensos e metais. O efeito da intensidade de chuva sobre o wash-off ficou evidente, visto que as chuvas simuladas com maior intensidade deslocaram mais poluentes. Neste estudo foram obtidos parâmetros para a modelagem da qualidade das águas pluviais.

**Palavras-chaves:** Acúmulo, carreamento, superfície pavimentada, água pluvial urbana.

## ABSTRACT

PAULETTI, L.I. **Build-up and wash-off of pollutants in surface parking.** MSc. Dissertation, Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, 2012.

The stormwater runoff in urban areas is an important source of non-point pollutants. This study aimed to quantify the build-up and wash-off of pollutants, particularly metals, water runoff from a paved surface urban Goiânia. Studies to estimate the processes of build-up and wash-off are still incipient in Brazil. We evaluated twelve plots paved with size of 3m<sup>2</sup>, located in a public parking lot, where they were analyzed on build-up and wash-off in June and July 2012. To wash-off was used a rainfall simulator in three intensities, 69 mm/h, 109 mm/h and 180 mm/h. Quantitation of accumulation in sampled surfaces determined load per m<sup>2</sup> to obtain the coefficient build-up as well as for the analysis of the influence of background dried days before sampling campaigns. The build-up was adjusted at four possible equations for use in models water quality: (1) Linear, (2) Power (3) Exponential, and (4) Michaelis-Menton by obtaining the best fit. The water quality parameters analyzed were used for calculation of Average Concentration Event (CME), building polutogramas, coefficient of wash-off and correlation analyzes. The accumulation rate obtained was, on average, 8.53 g/m<sup>2</sup>dia, and more days dry, the greater the accumulation of pollutants. Levels of metals were found in all analyzed plots for all simulated events in different periods. There sharp and direct correlation between variables, particularly suspended solids and metals. The intensity of rain on the wash-off was clear, since the simulated rain intensity shifted with greater dirtier. Parameters were obtained for modeling the quality of rainwater.

**Keywords:** Build-up, wash-off, paved surface, urban stormwater.



## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 2.1: Os efeitos da urbanização nos processos hidrológicos .....                                                 | 29 |
| FIGURA 2.2: Representação hipotética do processo de acumulação e carreamento<br>dos sedimentos ao longo do tempo ..... | 51 |
| FIGURA 2.3: Polutograma geral.....                                                                                     | 60 |
| FIGURA 3.1: Subáreas e parcelas experimentais na área de estudo .....                                                  | 62 |
| FIGURA 3.2: Coleta do acúmulo .....                                                                                    | 63 |
| FIGURA 3.3: Simulador de chuva .....                                                                                   | 66 |
| FIGURA 3.4: Detalhe dos aspersores de água em funcionamento .....                                                      | 67 |
| FIGURA 3.5: Quadro usado na delimitação das parcelas experimentais.....                                                | 69 |
| FIGURA 3.6: Equipamento instalado para coleta .....                                                                    | 70 |
| FIGURA 3.7: ICP para análise dos metais .....                                                                          | 72 |
| FIGURA 4.1: Gráfico do Build-up Linear .....                                                                           | 77 |
| FIGURA 4.2: Gráfico do Build-up Potencial .....                                                                        | 77 |
| FIGURA 4.3: Gráfico do Build-up Exponencial.....                                                                       | 78 |
| FIGURA 4.4: Gráfico do Build-up Michaelis-Menton .....                                                                 | 78 |

|                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 4.5: Box-Whisker de turbidez com diferentes DSA para cada intensidade .....          | 81 |
| FIGURA 4.6: Box-Whisker de pH com diferentes DSA para cada intensidade.....                 | 82 |
| FIGURA 4.7: Box-Whisker de alcalinidade com diferentes DSA para cada intensidade .....      | 83 |
| FIGURA 4.8: Box-Whisker de sólidos suspensos com diferentes DSA para cada intensidade ..... | 83 |
| FIGURA 4.9: Box-Whisker de cromo com diferentes DSA para cada intensidade.....              | 84 |
| FIGURA 4.10: Box-Whisker de cádmio com diferentes DSA para cada intensidade .....           | 85 |
| FIGURA 4.11: Box-Whisker de cobre com diferentes DSA para cada intensidade .....            | 85 |
| FIGURA 4.12: Box-Whisker de chumbo com diferentes DSA para cada intensidade .....           | 86 |
| FIGURA 4.13: Box-Whisker de níquel com diferentes DSA para cada intensidade .....           | 87 |
| FIGURA 4.14: Box-Whisker de zinco com diferentes DSA para cada intensidade .....            | 87 |
| FIGURA 4.15: Box-Whisker de manganês com diferentes DSA para cada intensidade .....         | 88 |
| FIGURA 4.16: Box-Whisker de ferro total com diferentes DSA para cada intensidade .....      | 89 |
| FIGURA 4.17: Box-Whisker de coliformes totais com diferentes DSA para cada                  |    |

|                                                                                                           |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| intensidade.....                                                                                          | 89 |
| FIGURA 4.18: Box-Whisker de coliformes termotolerantes com diferentes DSA para cada intensidade.....      | 90 |
| FIGURA 4.19: Análise de regressão SS x Cr.....                                                            | 93 |
| FIGURA 4.20: Análise de regressão SS x Cu.....                                                            | 93 |
| FIGURA 4.21: Análise de regressão SS x Pb .....                                                           | 93 |
| FIGURA 4.22: Análise de regressão SS x Ni.....                                                            | 93 |
| FIGURA 4.23: Análise de regressão SS x Zn .....                                                           | 94 |
| FIGURA 4.24: Análise de regressão SS x Mn .....                                                           | 94 |
| FIGURA 4.25: Análise de regressão SS x Fe.....                                                            | 94 |
| FIGURA 4.26: Polutograma de sólidos suspensos: (a) Evento 11/06; (b) Evento 19/06; (c) Evento 04/07 ..... | 95 |
| FIGURA 4.27: Polutograma de cromo: (a) Evento 11/06; (b) Evento 19/06; (c) Evento 04/07 .....             | 96 |
| FIGURA 4.28: Polutograma de cádmio: (a) Evento 11/06; (b) Evento 19/06; (c) Evento 04/07 .....            | 96 |
| FIGURA 4.29: Polutograma de cobre: (a) Evento 11/06; (b) Evento 19/06; (c) Evento 04/07 .....             | 97 |
| FIGURA 4.30: Polutograma de chumbo: (a) Evento 11/06; (b) Evento 19/06; (c)                               |    |

|                   |    |
|-------------------|----|
| Evento 04/07..... | 98 |
|-------------------|----|

|                                                                                               |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 4.31: Polutograma de níquel: (a) Evento 11/06; (b) Evento 19/06; (c) Evento 04/07..... | 98 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----|

|                                                                                              |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| FIGURA 4.32: Polutograma de zinco: (a) Evento 11/06; (b) Evento 19/06; (c) Evento 04/07..... | 99 |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|----|

|                                                                                                  |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| FIGURA 4.33: Polutograma de manganês: (a) Evento 11/06; (b) Evento 19/06; (c) Evento 04/07 ..... | 100 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

|                                                                                               |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| FIGURA 4.34: Polutograma de ferro: (a) Evento 11/06; (b) Evento 19/06; (c) Evento 04/07 ..... | 100 |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

|                                                                                                                                                        |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| FIGURA 4.35: Wash-off de Sólidos Suspensos para I = 69mm/h nos diferentes eventos: (a) Evento 11/06/12; (b) Evento 19/06/12; (c) Evento 04/07/12 ..... | 103 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

|                                                                                                                                                         |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| FIGURA 4.36: Wash-off de Sólidos Suspensos para I = 109mm/h nos diferentes eventos: (a) Evento 11/06/12; (b) Evento 19/06/12; (c) Evento 04/07/12 ..... | 103 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

|                                                                                                                                                         |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| FIGURA 4.37: Wash-off de Sólidos Suspensos para I = 180mm/h nos diferentes eventos: (a) Evento 11/06/12; (b) Evento 19/06/12; (c) Evento 04/07/12 ..... | 104 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

|                                                                                                                                            |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| FIGURA 4.38: Wash-off de Cromo para I = 69mm/h nos diferentes eventos: (a) Evento 11/06/12; (b) Evento 19/06/12; (c) Evento 04/07/12 ..... | 105 |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

|                                                                                                                                             |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| FIGURA 4.39: Wash-off de Cromo para I = 109mm/h nos diferentes eventos: (a) Evento 11/06/12; (b) Evento 19/06/12; (c) Evento 04/07/12 ..... | 105 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

|                                                                                                                                             |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| FIGURA 4.40: Wash-off de Cromo para I = 180mm/h nos diferentes eventos: (a) Evento 11/06/12; (b) Evento 19/06/12; (c) Evento 04/07/12 ..... | 106 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

|                                                                                              |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| FIGURA 4.41: Wash-off de Cádmio para $I = 69\text{mm/h}$ nos diferentes eventos: <b>(a)</b>  |     |
| Evento 11/06/12; <b>(b)</b> Evento 19/06/12; <b>(c)</b> Evento 04/07/12 .....                | 107 |
| FIGURA 4.42: Wash-off de Cádmio para $I = 109\text{mm/h}$ nos diferentes eventos: <b>(a)</b> |     |
| Evento 11/06/12; <b>(b)</b> Evento 19/06/12; <b>(c)</b> Evento 04/07/12 .....                | 107 |
| FIGURA 4.43: Wash-off de Cádmio para $I = 180\text{mm/h}$ nos diferentes eventos: <b>(a)</b> |     |
| Evento 11/06/12; <b>(b)</b> Evento 19/06/12; <b>(c)</b> Evento 04/07/12 .....                | 108 |
| FIGURA 4.44: Wash-off de Cobre para $I = 69\text{mm/h}$ nos diferentes eventos: <b>(a)</b>   |     |
| Evento 11/06/12; <b>(b)</b> Evento 19/06/12; <b>(c)</b> Evento 04/07/12 .....                | 109 |
| FIGURA 4.45: Wash-off de Cobre para $I = 109\text{mm/h}$ nos diferentes eventos: <b>(a)</b>  |     |
| Evento 11/06/12; <b>(b)</b> Evento 19/06/12; <b>(c)</b> Evento 04/07/12 .....                | 109 |
| FIGURA 4.46: Wash-off de Cobre para $I = 180\text{mm/h}$ nos diferentes eventos: <b>(a)</b>  |     |
| Evento 11/06/12; <b>(b)</b> Evento 19/06/12; <b>(c)</b> Evento 04/07/12 .....                | 110 |
| FIGURA 4.47: Wash-off de Chumbo para $I = 69\text{mm/h}$ nos diferentes eventos: <b>(a)</b>  |     |
| Evento 11/06/12; <b>(b)</b> Evento 19/06/12; <b>(c)</b> Evento 04/07/12 .....                | 111 |
| FIGURA 4.48: Wash-off de Chumbo para $I = 109\text{mm/h}$ nos diferentes eventos:            |     |
| <b>(a)</b> Evento 11/06/12; <b>(b)</b> Evento 19/06/12; <b>(c)</b> Evento 04/07/12 .....     | 111 |
| FIGURA 4.49: Wash-off de Chumbo para $I = 180\text{mm/h}$ nos diferentes eventos:            |     |
| <b>(a)</b> Evento 11/06/12; <b>(b)</b> Evento 19/06/12; <b>(c)</b> Evento 04/07/12 .....     | 112 |
| FIGURA 4.50: Wash-off de Níquel para $I = 69\text{mm/h}$ nos diferentes eventos: <b>(a)</b>  |     |
| Evento 11/06/12; <b>(b)</b> Evento 19/06/12; <b>(c)</b> Evento 04/07/12 .....                | 113 |
| FIGURA 4.51: Wash-off de Níquel para $I = 109\text{mm/h}$ nos diferentes eventos: <b>(a)</b> |     |
| Evento 11/06/12; <b>(b)</b> Evento 19/06/12; <b>(c)</b> Evento 04/07/12 .....                | 113 |
| FIGURA 4.52: Wash-off de Níquel para $I = 180\text{mm/h}$ nos diferentes eventos: <b>(a)</b> |     |

|                                                                                             |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Evento 11/06/12; <b>(b)</b> Evento 19/06/12; <b>(c)</b> Evento 04/07/12 .....               | 114 |
| FIGURA 4.53: Wash-off de Zinco para $I = 69\text{mm/h}$ nos diferentes eventos: <b>(a)</b>  |     |
| Evento 11/06/12; <b>(b)</b> Evento 19/06/12; <b>(c)</b> Evento 04/07/12 .....               | 115 |
| FIGURA 4.54: Wash-off de Zinco para $I = 109\text{mm/h}$ nos diferentes eventos: <b>(a)</b> |     |
| Evento 11/06/12; <b>(b)</b> Evento 19/06/12; <b>(c)</b> Evento 04/07/12 .....               | 115 |
| FIGURA 4.55: Wash-off de Zinco para $I = 180\text{mm/h}$ nos diferentes eventos: <b>(a)</b> |     |
| Evento 11/06/12; <b>(b)</b> Evento 19/06/12; <b>(c)</b> Evento 04/07/12 .....               | 116 |
| FIGURA 4.56: Wash-off de Manganês para $I = 69\text{mm/h}$ nos diferentes eventos:          |     |
| <b>(a)</b> Evento 11/06/12; <b>(b)</b> Evento 19/06/12; <b>(c)</b> Evento 04/07/12 .....    | 117 |
| FIGURA 4.57: Wash-off de Manganês para $I = 109\text{mm/h}$ nos diferentes eventos:         |     |
| <b>(a)</b> Evento 11/06/12; <b>(b)</b> Evento 19/06/12; <b>(c)</b> Evento 04/07/12 .....    | 117 |
| FIGURA 4.58: Wash-off de Manganês para $I = 180\text{mm/h}$ nos diferentes eventos:         |     |
| <b>(a)</b> Evento 11/06/12; <b>(b)</b> Evento 19/06/12; <b>(c)</b> Evento 04/07/12 .....    | 118 |
| FIGURA 4.59: Wash-off de Ferro total para $I = 69\text{mm/h}$ nos diferentes eventos:       |     |
| <b>(a)</b> Evento 11/06/12; <b>(b)</b> Evento 19/06/12; <b>(c)</b> Evento 04/07/12 .....    | 119 |
| FIGURA 4.60: Wash-off de Ferro total para $I = 109\text{mm/h}$ nos diferentes eventos:      |     |
| <b>(a)</b> Evento 11/06/12; <b>(b)</b> Evento 19/06/12; <b>(c)</b> Evento 04/07/12 .....    | 119 |
| FIGURA 4.61: Wash-off de Ferro total para $I = 180\text{mm/h}$ nos diferentes eventos:      |     |
| <b>(a)</b> Evento 11/06/12; <b>(b)</b> Evento 19/06/12; <b>(c)</b> Evento 04/07/12 .....    | 120 |
| FIGURA 4.62: Relação $I \times$ Wash-off de SS.....                                         | 122 |
| FIGURA 4.63: Relação $I \times$ Wash-off de Cr .....                                        | 122 |
| FIGURA 4.64: Relação $I \times$ Wash-off de Cd .....                                        | 122 |
| FIGURA 4.65: Relação $I \times$ Wash-off de Cu .....                                        | 122 |

|                                               |     |
|-----------------------------------------------|-----|
| FIGURA 4.66: Relação I x Wash-off de Pb ..... | 122 |
| FIGURA 4.67: Relação I x Wash-off de Ni ..... | 122 |
| FIGURA 4.68: Relação I x Wash-off de Zn.....  | 123 |
| FIGURA 4.69: Relação I x Wash-off de Mn.....  | 123 |
| FIGURA 4.70: Relação I x Wash-off de Fe ..... | 123 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| TABELA 2.1: Constituintes no escoamento e suas fontes primárias.....                                                                                                                                                                                                                                                                | 31 |
| TABELA 2.2: Origem e natureza dos poluentes.....                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 32 |
| TABELA 2.3: Classificação dos diferentes tipos de poluentes.....                                                                                                                                                                                                                                                                    | 33 |
| TABELA 2.4: Alguns eventos e suas consequências em Goiânia .....                                                                                                                                                                                                                                                                    | 37 |
| TABELA 2.5: Fontes de metais pesados em um ambiente urbano .....                                                                                                                                                                                                                                                                    | 47 |
| TABELA 3.1: Intensidades médias para as três condições de calibração do<br>simulador de chuvas artificiais .....                                                                                                                                                                                                                    | 68 |
| TABELA 3.2: Parâmetros de qualidade da água, métodos e equipamentos<br>utilizados.....                                                                                                                                                                                                                                              | 71 |
| TABELA 4.1: Amostra do build-up coletada em cada parcela e respectivo período<br>seco .....                                                                                                                                                                                                                                         | 76 |
| TABELA 4.2: Resumo dos resultados das análises de qualidade da água.....                                                                                                                                                                                                                                                            | 78 |
| TABELA 4.3: CME para cada evento nas três campanhas amostrais.....                                                                                                                                                                                                                                                                  | 80 |
| TABELA 4.4: Coeficiente de correlação Pearson com base nas variáveis<br>analisadas (Turbidez (TURB), pH, Alcalinidade (ALC), Sólidos suspensos (SS),<br>Cromo (Cr), Cádmio (Cd), Cobre (Cu), Chumbo (Pb), Níquel (Ni), Zinco (Zn),<br>Manganês (Mn), Ferro (Fe), Coliformes Totais (Cto) e Coliformes<br>Termotolerantes (Cte)..... | 92 |



|                                                                                                    |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| TABELA 4.5: Tabela de Rugg para aquilatar os valores do coeficiente de correlação de Pearson ..... | 92  |
| TABELA 4.6: Valores estimados para o coeficiente de wash-off (K).....                              | 121 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|                |                                                  |
|----------------|--------------------------------------------------|
| C              | Concentração.                                    |
| Ca             | Carga.                                           |
| Cd             | Cádmio.                                          |
| CME            | Concentração média do evento.                    |
| Cr             | Cromo.                                           |
| Cte            | Coliformes termotolerantes.                      |
| Cto            | Coliformes totais.                               |
| D              | Dia.                                             |
| DAS            | Dia seco antecedente.                            |
| EEC            | Escola de Engenharia Civil.                      |
| Fe             | Ferro.                                           |
| H              | Hora.                                            |
| G              | Grama.                                           |
| I              | Intensidade.                                     |
| IBGE           | Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. |
| i-d-f          | Intensidade-duração-frequência.                  |
| K              | Coeficiente de wash-off.                         |
| L              | Litro.                                           |
| m <sup>2</sup> | Metro Quadrado.                                  |
| m <sup>3</sup> | Metro Cúbico.                                    |
| Ma             | Massa acumulada.                                 |
| Min            | Minuto.                                          |
| Mm             | Milímetro.                                       |
| Mg             | Miligrama.                                       |
| mL             | Mililitro.                                       |
| Mn             | Manganês.                                        |
| Ni             | Níquel.                                          |

|      |                                              |
|------|----------------------------------------------|
| NMP  | Número Mais Provável.                        |
| PAH  | Hidrocarboneto policíclico aromático.        |
| Pb   | Chumbo.                                      |
| pH   | Potencial Hidrogeniônico.                    |
| Q    | Vazão.                                       |
| R    | Coeficiente de correlação Pearson.           |
| S    | Segundo.                                     |
| SS   | Sólidos suspensos.                           |
| SWMM | Stormwater Management Model.                 |
| T    | Tempo.                                       |
| UFG  | Universidade Federal de Goiás.               |
| UFRN | Universidade Federal do Rio Grande do Norte. |
| UNT  | Unidade Nefelométrica de Turbidez.           |
| V    | volume.                                      |
| Zn   | Zinco.                                       |

## SUMÁRIO

|                                                     |    |
|-----------------------------------------------------|----|
| CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....                        | 22 |
| 1.1 INTRODUÇÃO.....                                 | 22 |
| 1.2 JUSTIFICATIVA .....                             | 23 |
| 1.3 OBJETIVOS.....                                  | 24 |
| 1.3.1 Objetivo geral .....                          | 24 |
| 1.3.2 Objetivos específicos.....                    | 25 |
| <br>CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....         | 26 |
| 2.1 URBANIZAÇÃO E QUALIDADE DE ÁGUA .....           | 26 |
| 2.1.1 Município de Goiânia .....                    | 35 |
| 2.2 POLUENTES .....                                 | 38 |
| 2.2.1 Potencial hidrogeniônico .....                | 40 |
| 2.2.2 Turbidez.....                                 | 41 |
| 2.2.3 Alcalinidade.....                             | 42 |
| 2.2.4 Sólidos suspensos .....                       | 42 |
| 2.2.5 Coliformes totais e termotolerantes .....     | 43 |
| 2.2.6 Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos ..... | 45 |
| 2.2.7 Metais .....                                  | 46 |
| 2.3 ACÚMULO E CARREAMENTO DE POLUENTES.....         | 48 |
| 2.3.1 Acúmulo – Build-up .....                      | 48 |
| 2.3.1.1 Build-up de metais.....                     | 52 |
| 2.3.2 Carreamento – Wash-off .....                  | 53 |
| 2.3.2.1 Wash-off de metais .....                    | 55 |
| 2.3.3 Concentração Média do Evento - CME.....       | 57 |
| 2.3.4 Polutograma.....                              | 59 |
| <br>CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS .....          | 61 |
| 3.1 ÁREA DE ESTUDO .....                            | 61 |
| 3.1.1 Seleção dos pontos de amostragem .....        | 61 |

|                                                         |     |
|---------------------------------------------------------|-----|
| 3.2 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS.....                    | 62  |
| 3.2.1 Determinação do Build-up .....                    | 62  |
| 3.2.2 Determinação do Wash-off.....                     | 64  |
| 3.2.2.1 Chuva simulada .....                            | 64  |
| 3.2.2.2 Simulador de chuva .....                        | 66  |
| 3.2.2.3 Calibração do simulador de chuva.....           | 67  |
| 3.2.2.4 Coleta de wash-off.....                         | 68  |
| 3.2.2.5 Parâmetros de controle .....                    | 71  |
| 3.2.3 Equações.....                                     | 73  |
| 3.2.4 Cálculo da CME e construção de polutogramas.....  | 74  |
| 3.2.5 Análise estatística .....                         | 75  |
| <br>CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES .....          | 76  |
| 4.1 INTRODUÇÃO.....                                     | 76  |
| 4.2 CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS.....                        | 76  |
| 4.2.1 Build-up .....                                    | 76  |
| 4.2.2 Análise dos parâmetros de qualidade da água ..... | 78  |
| 4.2.2.1 Concentração média dos eventos – CME's .....    | 79  |
| 4.2.2.2 Box Whisker dos parâmetros de qualidade .....   | 80  |
| 4.2.3 Correlação entre parâmetros .....                 | 91  |
| 4.2.4 Polutogramas .....                                | 95  |
| 4.2.5 Estimativa do coeficiente de wash-off .....       | 101 |
| 4.2.6 Relação entre Intensidade e Wash-off .....        | 121 |
| <br>CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....       | 125 |
| <br>REFERÊNCIAS .....                                   | 126 |

## **CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO**

### **1.1 INTRODUÇÃO**

O crescimento ou adensamento das populações urbanas levou ao aumento de áreas impermeáveis como telhados, ruas, estacionamentos, entre outras, alterando o ciclo hidrológico natural, diminuindo a infiltração da água no solo, e consequentemente, aumentando o escoamento superficial.

O resultado da impermeabilização das superfícies tem gerado problemas, como as enchentes, enxurradas, inundações e a degradação da qualidade das águas pluviais. Ocorre alteração da qualidade da água dos corpos hídricos que recebem a carga poluente e resíduos das águas pluviais. Estes poluentes advêm do acúmulo de poluentes sobre superfícies urbanas, entre os quais se destacam nutrientes, metais pesados, hidrocarbonetos e sólidos suspensos, os quais são conduzidos até os corpos d'água durante eventos chuvosos.

O desenvolvimento urbano brasileiro tem contribuído com um aumento significativo na frequência das inundações, na produção de sedimentos e na deterioração da qualidade da água. A urbanização intensa e descontrolada, juntamente com o crescimento industrial, causaram grandes mudanças no ambiente, afetando a qualidade do escoamento urbano e, consequentemente, dos recursos hídricos.

As enchentes urbanas ocorrem devido à falta de planejamento da drenagem urbana, somado às alterações que o meio sofre em decorrência do uso do solo, constituindo fatores favoráveis ao surgimento de problemas de difíceis soluções e, na maioria das vezes, que requerem medidas onerosas, produzindo custos elevados para a sociedade.

Neste contexto, em virtude do rápido crescimento urbano, os principais impactos diretos são as enchentes e inundações de áreas urbanas e ribeirinhas. Como impactos indiretos, ocorrem assoreamentos dos canais de drenagem, rios e lagos urbanos, transporte de substâncias

poluentes, dentre outros (TUCCI; PORTO; BARROS, 1995). Conseqüentemente, os prejuízos também estão relacionados à perda da qualidade da água.

O escoamento de águas pluviais em áreas urbanas é uma importante fonte não-pontual de poluentes (Pitt et al., 1996). Contudo, para se atingir a qualidade da água nos meios receptores é necessário monitorar todos os efluentes que atingem o meio, incluindo as águas pluviais, dentre outras estratégias de ação. As águas pluviais são portadoras de cargas de poluentes que não podem ser desprezadas. A falta de gestão e tratamento das águas pluviais pode inviabilizar o esforço feito para obtenção de melhor qualidade de água, refletindo em forma de impactos ao meio ambiente, e conseqüentemente, à sociedade que está inserida no mesmo.

O estudo da qualidade da água através do escoamento superficial avalia uma situação crítica da água tendo em conta os efeitos naturais e antropogênicos. É de fundamental importância investigar a qualidade da água dos ambientes urbanos. A contaminação de cursos d'água em comunidades urbanas afeta seriamente a utilidade da água para diversos fins, além de afetar a “saúde” dos ecossistemas aquáticos.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

O município de Goiânia apresenta um alto índice de impermeabilização da área urbana inferindo em freqüentes eventos de inundação, sofrendo com perdas de infra-estrutura física, prejuízos à saúde humana e dos ecossistemas. O rápido processo de crescimento demográfico e a expansão urbana desordenada, com diferentes usos do solo, resultaram em problemas ambientais, dentre os quais pode-se destacar a poluição dos corpos d'água, principalmente os que drenam a malha urbana.

A má qualidade das águas de drenagem urbana piora a qualidade da água de corpos hídricos. Práticas de manejo dessas águas são, muitas vezes, inviabilizadas pela falta de estudos e

dados que forneçam subsídios para implantação de medidas de gerenciamento, como a falta de parâmetros para a modelagem da qualidade das águas urbanas.

As pesquisas na área de qualidade das águas de drenagem urbana são ainda insipientes no Brasil. Embora existam na literatura estudos sobre a qualidade das águas de drenagem urbana, além de serem limitados, geralmente são focados em sólidos suspensos e nutrientes, e ainda são realizados em diferentes condições urbanas. Estudos sobre o acúmulo (build-up) e carreamento (wash-off) de metais pesados são restritos, ainda que estes podem causar doenças significantes e impactos ambientais mesmo em baixas concentrações.

Diante disso, este trabalho se justifica, principalmente, na necessidade real de pesquisas para verificar a carga de poluentes nas águas de drenagem urbana, gerando dados de qualidade de água em ambientes urbanos, concedendo, assim, auxílio na busca de implementações de melhores práticas de gestão para se atingir as metas da qualidade das águas urbanas, levando a possíveis soluções para os problemas apresentados.

É importante destacar que será a primeira experiência de avaliação da carga de metais na água de drenagem de uma área urbana de Goiânia, sendo importante para previsão de impactos de mudanças urbanas, dimensionamento de estruturas e seleção de alternativas de manejo.

## 1.3 OBJETIVOS

### 1.3.1 Objetivo geral

O objetivo geral da pesquisa foi quantificar o acúmulo e carreamento de poluentes, principalmente metais, na água do escoamento de uma superfície pavimentada urbana de Goiânia.



### **1.3.2 Objetivos específicos**

Foram objetivos específicos da pesquisa:

- a)** quantificar o acúmulo (build-up) na superfície analisada;
- b)** estimar o carreamento (wash-off) de poluentes usando um simulador de chuva reproduzindo três eventos de chuva;
- c)** avaliar a concentração de metais (cromo, cádmio, cobre, chumbo, níquel, zinco, manganês, ferro), além de PAHs, turbidez, pH, alcalinidade, sólidos suspensos, coliformes totais e coliformes termotolerantes nas águas do escoamento;
- d)** verificar existência de correlação entre os parâmetros de qualidade da água analisados;
- e)** relacionar intensidade de chuva e wash-off;
- e)** fornecer subsídios para a modelagem de qualidade das águas pluviais por meio da estimativa dos parâmetros relativos às operações de acúmulo e carreamento de poluentes.

## **CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

Essa revisão bibliográfica buscou amear informações básicas fundamentais para a presente pesquisa, incluindo os aspectos gerais referentes à urbanização e a qualidade de água, aspectos relevantes nesse contexto sobre o município de Goiânia; uma caracterização dos poluentes, principalmente metais nas águas de drenagem e consequentes impactos causados; e a definição do acúmulo (build-up) e carreamento (wash-off) de poluentes. Cada um desses assuntos foi enfocado em subitens específicos que são apresentados a seguir.

### **2.1 URBANIZAÇÃO E QUALIDADE DE ÁGUA**

A urbanização implica em alterações significativas no meio ambiente, de forma geral, e nos processos hidrológicos, em particular, através da ação direta nos cursos d'água e nas superfícies das bacias hidrográficas, como um todo. Segundo Tucci e Collischonn (1998), à medida que a cidade se urbaniza, em geral, ocorrem os seguintes impactos: aumento das vazões máximas devido ao aumento da capacidade de escoamento através de condutos e canais e impermeabilização das superfícies; aumento da produção de sedimentos devido à falta de proteção das superfícies e de resíduos sólidos; e deterioração da qualidade da água devido à lavagem das superfícies, transporte de material sólido e as ligações clandestinas de esgoto cloacal e pluvial.

Segundo Bernardes e Soares (2003), por muitos anos, em função da conjuntura política e econômica do país, privilegiaram-se os sistemas de abastecimento de água, em grande escala, e de esgotos sanitários, em menor grau, deixando em segundo plano os investimentos na drenagem urbana. Contudo, a visão limitada que trata as questões urbanas de forma isolada ou compartimentada é uma das principais causas de acentuação dos problemas urbanos.

Porto (2001) diz que a urbanização e seus impactos sobre os recursos hídricos e o meio ambiente, requerem abordagem integrada, trazendo para um mesmo núcleo de ações aquelas relativas à quantidade e qualidade da água, os aspectos de planejamento urbano, as interações entre os diversos usos do solo e, principalmente, os aspectos institucionais e legais necessários para o embasamento e a sustentabilidade das ações de prevenção e controle.

A drenagem urbana representa hoje uma fonte importante de prejuízos para população urbana das cidades, devido à frequentes inundações e à deterioração ambiental. Muito pouco tem sido realizado no sentido de buscar controlar esse processo no Brasil. A posição que se costuma adotar é de resignação frente à fatalidade de um evento “natural”, quando na realidade, o impacto foi gerado pela urbanização inadequada, que requer medidas preventivas de controle distribuído e regulamentação. Para que isto ocorra são necessárias medidas administrativas e técnicas que são implantadas através do Plano Diretor Urbano (TUCCI e COLLISCHONN, 1998).

O Plano Diretor de Drenagem Urbana é o conjunto de diretrizes que determinam a gestão do sistema de drenagem, minimizando o impacto ambiental devido ao escoamento das águas pluviais (CAMPOS *et al.*, 2003). Este planejamento visa evitar perdas econômicas, melhoria das condições de saúde e meio ambiente da cidade.

De acordo com Tucci (2003) o Plano se baseia em princípios onde os principais são os seguintes: os novos desenvolvimentos não podem aumentar a vazão máxima de jusante; o planejamento e controle dos impactos existentes devem ser elaborados considerando a bacia como um todo; o horizonte de planejamento deve ser integrado ao Plano Diretor da cidade; e o controle dos efluentes deve ser avaliado de forma integrada com o esgotamento sanitário e os resíduos sólidos.

Entretanto, todas essas questões são baseadas num arcabouço jurídico para regulamentação e controle que apresentam uma série de conflitos que acabam por dificultar o adequado gerenciamento da drenagem urbana. Um desses conflitos é a inadequação de investimentos no monitoramento hidrológico e ambiental, causando desconhecimento relativo,

pelas equipes técnicas, dos processos físicos envolvidos na questão da drenagem urbana no Brasil.

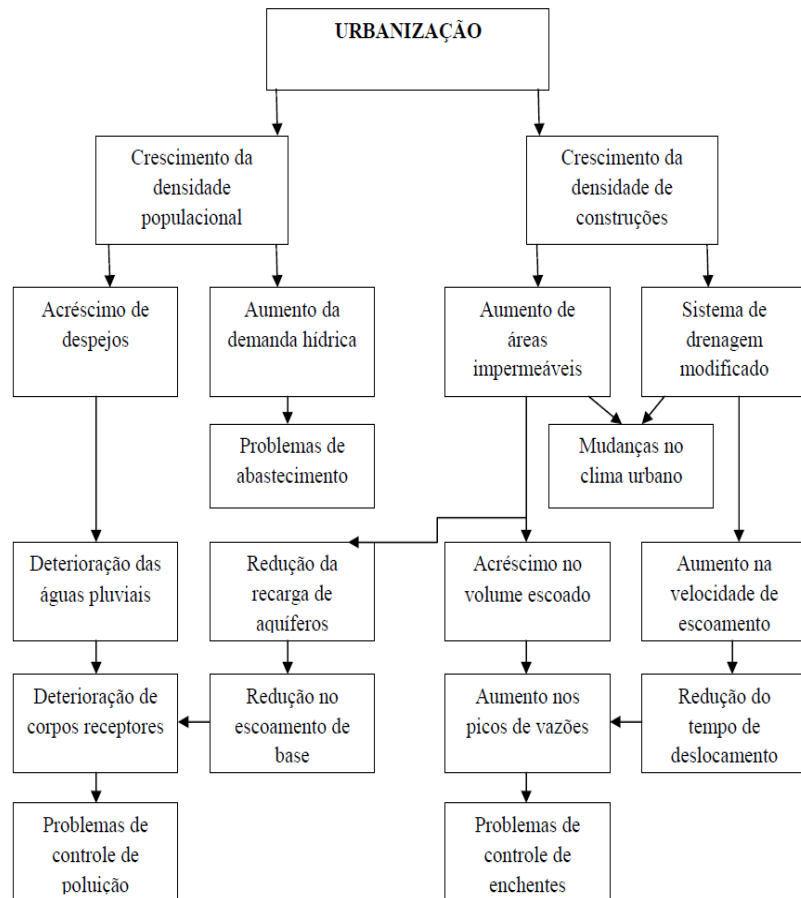
Conforme visto anteriormente, a urbanização altera o balanço hídrico e gera inúmeros impactos ambientais, os quais podem ser minimizados pelo planejamento de sistemas de drenagem, portanto quanto maior for a compreensão entre as relações espaço urbano – ciclo hidrológico, maior será o potencial do planejamento.

A existência de aglomerados urbanos provoca vários impactos, dentre eles, o impacto sobre a qualidade da água. Segundo Tucci (2003), o impacto sobre a qualidade da água é resultado do seguinte: (1) poluição existente no ar que se precipita junto com a água; (2) lavagem das superfícies urbanas contaminadas com diferentes componentes orgânicos e metais; (3) resíduos sólidos representados por sedimentos erodidos pelo aumento da vazão e lixo urbano depositado ou transportado para a drenagem; e (4) esgoto doméstico interligado no sistema de drenagem.

O desenvolvimento urbano tem produzido um ciclo de contaminação dos corpos d'água gerado pelos efluentes de esgoto doméstico/industrial e o esgoto pluvial. Esse processo ocorre em razão do despejo sem tratamento dos esgotos sanitários nos rios, contaminando os sistemas hídricos e do esgoto pluvial que transporta grande quantidade de poluição orgânica e de metais que atingem os rios nos períodos chuvosos e contaminam as águas superficiais e subterrâneas (TUCCI, 2008).

A impermeabilização de maiores parcelas reduz a quantidade de água que penetra no solo, diminuindo a vazão de rios entre os períodos chuvosos, pois nestes períodos a alimentação é realizada pelo aquífero, que agora é menos recarregado; e tal fato é ainda acompanhado pelo aumento do volume de dejetos e substâncias jogados aos mananciais, provocando uma queda na qualidade das águas locais, gerando um problema hidrológico: o controle da poluição (TUCCI, VILLANUEVA e CRUZ, 2000).

A **Figura 2.1** apresenta um fluxograma dos problemas citados nos processos hidrológicos.



**Figura 2.1** – Os efeitos da urbanização nos processos hidrológicos (TUCCI e MARQUES, 2000).

Canholi (2005) diz que enquanto nos países mais desenvolvidos a ênfase nas questões de drenagem urbana se concentra nos aspectos relativos à qualidade da água coletada, encontrando-se as práticas ligadas ao controle das inundações em geral bastante adiantadas, no Brasil, o controle quantitativo das enchentes ainda é o principal objetivo das ações.

Segundo Campos *et al.*, (2003), no Brasil, ainda não há uma grande preocupação com a qualidade da água de drenagem. Entretanto, a problemática carência do saneamento básico e drenagem nas cidades, que transforma os córregos urbanos em condutores de esgotos doméstico e pluvial a céu aberto, traz nas inundações, além dos danos acarretados ao tráfego, às propriedades,

às moradias e ao comércio, doenças decorrentes do contato com a água contaminada, além de vários problemas ambientais.

De acordo com Tucci (2008), os principais problemas relacionados com a infraestrutura de água no ambiente urbano são: (1) falta de tratamento de esgoto – grande parte das cidades não possui tratamento de esgoto e, ainda, lança os efluentes na rede de esgotamento pluvial, que escoam pelos rios urbanos; (2) outras cidades optam por implantar as redes de esgotamento sanitário, mas não implementam a rede de drenagem urbana, sofrendo frequentes inundações com o aumento da impermeabilização; (3) ocupação do leito de inundação ribeirinha, sofrendo frequentes inundações; (4) impermeabilização e canalização dos rios urbanos com aumento da vazão de cheia e sua frequência e aumento da carga de resíduos sólidos e da qualidade da água pluvial sobre os rios próximos das áreas urbanas; e (5) deterioração da qualidade da água por falta de tratamento dos efluentes criando riscos ao abastecimento da população em vários cenários, sendo o mais crítico a ocupação das áreas de contribuição de reservatórios de abastecimento urbano.

Burton e Pitt (2001) citam que uma grande variedade de atividades constituem fontes não-pontuais de poluição nas águas. As principais categorias de fontes incluem a agricultura, extração de recursos, modificações hidrológicas, áreas urbanas, eliminação de terra e sedimentos contaminados. A contribuição de cada categoria é, naturalmente, uma questão de local específico. Esses contribuintes incluem a destruição do ambiente natural com a remoção da vegetação e zona ribeirinha, perda de áreas protegidas, canalizações, assoreamentos, entre outros, e ainda, o uso de agrotóxicos.

Nas áreas urbanas, o comprometimento dos corpos d'água é também devido à destruição do ambiente natural, mas, além disso, devido aos contaminantes físicos e químicos provenientes de escoamento de áreas impermeáveis, como ruas e estacionamentos, além das construções de áreas industriais, comerciais e residenciais. Os poluentes presentes no escoamento de águas pluviais variam de acordo com cada bacia hidrográfica, estando associados com atividades específicas e com usos da área.

Uma série de estudos tem relacionado poluentes específicos no escoamento de águas pluviais com as suas fontes. Uma revisão na literatura sobre fontes de poluição de águas pluviais e seus efeitos, e também, medições de poluentes em amostras de uma variedade de categorias de fontes urbanas, mostraram que as maiores concentrações de compostos orgânicos sintéticos foram detectadas no escoamento de telhados, em córregos urbanos e nos esgotos combinados. Encontrou-se maior presença de zinco no escoamento de telhados (calhas galvanizadas), níquel nas áreas de estacionamento e cádmio e chumbo em áreas de grande circulação de veículos. As substâncias tóxicas mais comuns são provenientes do uso do automóvel (hidrocarbonetos policíclicos aromáticos), combustão e solventes de uso industrial e residencial, além de uma variedade de compostos agrícolas. As principais fontes de poluição urbana são locais em construção, sistemas de esgoto, lixo doméstico, ruas, áreas industriais e áreas de estacionamento. Os poluentes primários são solos erodidos (sedimentos suspensos, sólidos dissolvidos e turbidez), fertilizantes, hidrocarbonetos e metais. A maioria dos metais no escoamento de águas pluviais são provenientes de ruas e áreas de estacionamento (PITT *et al.*, 1995).

A **Tabela 2.1** apresenta alguns constituintes no escoamento superficial e suas fontes.

**Tabela 2.1** – Constituintes no escoamento e suas fontes primárias  
(BURTON e PITT, 2001).

| CONSTITUINTES       | FONTES PRIMÁRIAS                                                                                                                           |
|---------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Partículas          | Desgaste dos pavimentos, veículos, atmosfera.                                                                                              |
| Nitrogênio, Fósforo | Atmosfera, aplicação de fertilizantes na beira das vias.                                                                                   |
| Chumbo              | Gasolina com chumbo, desgaste dos pneus (material de enchimento de óxido de chumbo, óleo lubrificante e graxa, desgaste do rolamento).     |
| Zinco               | Desgaste dos pneus (materiais de enchimento), óleo do motor (aditivo estabilizante), gordura.                                              |
| Ferro               | Auto ferrugem, estruturas de aço, peças de motor.                                                                                          |
| Cobre               | Metalização, desgaste dos rolamentos e buchas, peças do motor, desgaste do freio, fungicidas e inseticidas.                                |
| Cádmio              | Desgaste dos pneus (material de enchimento), aplicação de inseticida.                                                                      |
| Cromo               | Metalização, peças do motor, desgaste do revestimento.                                                                                     |
| Níquel              | Diesel e gasolina, óleo lubrificante, chapeamento de metal, desgaste de buchas, desgaste de revestimento de freio, pavimentação asfáltica. |

Cont. **Tabela 2.1** – Constituintes no escoamento e suas fontes primárias

| CONSTITUINTES | FONTES PRIMÁRIAS                                                          |
|---------------|---------------------------------------------------------------------------|
| Manganês      | Peças de motor.                                                           |
| Petróleo      | Derramamentos, vazamentos de lubrificantes do motor, fluidos hidráulicos. |

Segundo Chocat *et al.*, (1997), parte da poluição de origem pluvial é diretamente atribuída à chuva. Estima-se geralmente que esta parte é de 15% a 25% da carga de poluição. O restante provém do escoamento das águas pluviais sobre as superfícies urbanas onde os poluentes se acumulam nos períodos de estiagem. As águas pluviais lavam as superfícies impermeáveis carreando grande parte dos poluentes aí depositados. As principais origens da poluição em meio urbano estão resumidas na **Tabela 2.2**.

**Tabela 2.2** – Origem e natureza dos poluentes  
(CHOCAT *et al.*, 1997).

| ORIGEM                   | NATUREZA DOS POLUENTES                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|--------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Circulação de automóveis | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Hidrocarbonetos (óleos, graxas e gasolina);</li> <li>▪ Metais provenientes do desgaste dos pneus (zinco, cádmio, cobre) e de peças metálicas (titânio, cromo, alumínio), chumbo (gasolina);</li> <li>▪ Óxido de nitrogênio (gases de escapamento);</li> <li>▪ Poluentes provenientes da erosão de pavimentos de vias (elementos procedentes do cimento ou do pavimento das calçadas, das pinturas do pavimento, notadamente o chumbo).</li> </ul> |
| Indústria                | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Metais (chumbo, cádmio, zinco);</li> <li>▪ Resíduos de petróleo e micro poluentes orgânicos rejeitados sob a forma líquida ou gasosa podendo ser carregados por longas distâncias.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Animais                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Matéria orgânica proveniente de dejetos de animais (domésticos ou selvagens) que podem constituir-se em fonte de contaminação bacteriana.</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Resíduos sólidos         | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Matéria orgânica, plásticos, metais diversos, papéis, etc. Rejeitados diretamente nas bocas de lobo, provenientes da lixiviação das superfícies urbanas pelas águas pluviais, de depósitos ilegais de resíduos sólidos ou de aterros sanitários mal geridos;</li> <li>▪ Poeiras contendo diferentes poluentes (em particular, o zinco que provém de usinas de incineração emitindo grandes quantidades de poluentes).</li> </ul>                  |



Cont. **Tabela 2.2** – Origem e natureza dos poluentes

| <b>ORIGEM</b>                           | <b>NATUREZA DOS POLUENTES</b>                                                                                                                                                                                                                        |
|-----------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Erosão dos solos e em canteiro de obras | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Matéria em suspensão (poluição mineral que pode conter agentes ativos como o asfalto).</li> </ul>                                                                                                           |
| Vegetação                               | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Matérias carbônicas, mais ou menos biodegradáveis (folhas mortas, polens);</li> <li>▪ Nitratos e fosfatos provenientes de adubos;</li> <li>▪ Compostos organoclorados (pesticidas e herbicidas).</li> </ul> |

Uma das formas de avaliar a qualidade da água urbana é por meio dos parâmetros que caracterizam a poluição orgânica e a quantidade de metais. Entre os numerosos parâmetros que caracterizam as águas do ponto de vista físico, químico e biológico, encontra-se na **Tabela 2.3** uma classificação dos diferentes tipos de poluentes em relação à sua incidência no meio e seus parâmetros associados.

**Tabela 2.3** – Classificação dos diferentes tipos de poluentes (KRAJEWSKI *et al.*, 2000).

| <b>TIPOS DE POLUENTES</b> | <b>IMPACTOS SOBRE O MEIO E SOBRE OS USOS DA ÁGUA</b>                                                                     | <b>PARÂMETROS ASSOCIADOS</b>                                                                                                   | <b>ORIGENS POSSÍVEIS DOS POLUENTES</b>                                                                                              |
|---------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Partículas                | Colmatação de leitos ou de estruturas de infiltração, diminuição da transparência, vetor de outros poluentes.            | Sólidos suspensos, sólidos suspensos voláteis, sólidos suspensos totais, matérias decantáveis, turbidez.                       | Erosão dos solos, lixiviação de superfícies, efluentes domésticos e industriais.                                                    |
| Orgânicos                 | Desoxigenação do ambiente, desenvolvimento excessivo de bactérias.                                                       | DQO, DBO, COT, COD.                                                                                                            | Águas residuárias urbanas, industriais ou agrícolas.                                                                                |
| Nutrientes                | Eutrofização das águas superficiais, consumo de oxigênio, efeitos tóxicos, dificuldades para a produção de água potável. | $\text{NO}_2^-$ , $\text{NO}_3^-$ , nitrogênio total kjeldahl, nitrogênio orgânico, nitrogênio total, $\text{PO}_4^{3-}$ , PT. | Escoamento sobre zonas de utilização de adubos, criação de animais, produção de adubos, produtos da degradação de matéria orgânica. |
| Tóxicos                   | Toxicidade, inibição da vida aquática, destruição da flora, mau gosto na                                                 | Metais pesados, fenóis, cianuretos, hidrocarbonetos.                                                                           | Rejeitos industriais, circulação de automóveis, corrosão                                                                            |

|                 |                                                                                                              |                                                                                                                              |                                                            |
|-----------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
|                 | água.                                                                                                        |                                                                                                                              | dos materiais de construção (metais).                      |
| Bioacumulativos | Acumulação na cadeia trófica, toxicidade.                                                                    | Pesticidas (organoclorados, organofosforados, organometálicos), PCB.                                                         | Agricultura, isolantes e materiais plásticos.              |
| Bacteriológicos | Risco para a balneabilidade, dificuldades para a produção de água potável.                                   | Coliformes, estreptococos, salmonelas, E.coli, vírus.                                                                        | Poluição doméstica, criação de animais.                    |
| Minerais        | Comprometimento à produção de água potável, agressividade para as canalizações, dispersão de metais pesados. | $\text{Cl}^-$ , $\text{Na}^+$ , $\text{K}^+$ , $\text{Mg}^{2+}$ , $\text{Ca}^{2+}$ , $\text{CO}_3^{2-}$ , $\text{HCO}_3^-$ . | Efluentes de indústrias que usam sais, poluição doméstica. |
| Radioatividade  | Acumulação na cadeia trófica, toxicidade.                                                                    | Contagem dos raios e das partículas $\alpha$ , $\beta$ , $\gamma$ .                                                          | Hospitais, indústrias.                                     |

A qualidade da água pluvial depende de vários fatores, como a limpeza urbana e sua frequência, a intensidade da precipitação e sua distribuição temporal e espacial, a época do ano e o tipo de uso da área urbana (TUCCI, 2008).

Campos *et al.*, (2003) relatam que a falta de conscientização da população tem trazido grandes prejuízos à qualidade da água pluvial escoada para os cursos d'água. É fundamental a criação de programas de incentivos para mudanças de hábitos da população, além de medidas de gestão das águas pluviais urbanas.

Nos últimos anos, os países têm investido no desenvolvimento de uma política de desenvolvimento sustentável urbano baseado no tratamento das águas pluviais urbanas, conservação do escoamento pluvial e tratamento dos efluentes. A base desse desenvolvimento no uso do solo é a implementação da urbanização preservando os caminhos naturais do escoamento e priorizando a infiltração.

De acordo com Tucci (2003), o Brasil, infelizmente, está atrasado nesse desenvolvimento em razão da falta de tratamento de esgoto, transferência de inundação na drenagem e falta de controle dos resíduos.

### **2.1.1 Município de Goiânia**

Goiânia localiza-se na mesorregião Centro-Goiano. Fundada em 24 de outubro de 1933 e absorvendo em 1937 a função de capital do estado, obteve um crescimento populacional e consequentemente urbano acelerado nas últimas décadas, superando muito a previsão inicial da população que era de 50 mil habitantes, chegando a 1.302.001 habitantes de acordo com o censo 2010 do IBGE.

Com isso, passou por diversos momentos de pressão popular e da iniciativa privada para alteração de sua legislação urbana. Desde o primeiro Código de Edificações, apresentado em 1947, o qual incluía toda legislação urbana referente ao uso do solo, iniciou-se a abertura da zona suburbana à economia de mercado, atribuindo a implantação de infra-estrutura aos proprietários, tais como pavimentação com galerias de águas pluviais e redes de água e esgoto. Contudo, posteriormente à Lei Nº176 de 16/03/50, a implantação da infra-estrutura ficou a cargo da Prefeitura. Durante os anos 50 e meados dos 60 a ocupação do solo ficou a cargo do setor imobiliário e proprietários que parcelavam suas glebas de terras e vendiam-nas sem infra-estrutura. Nos anos 70, através da Lei Municipal Nº4526 de 31/12/71, voltava-se a exigir do proprietário a instalação de toda a infra-estrutura e mesmo assim, houve uma expansão de loteamentos clandestinos por se localizarem fora dos limites da zona de expansão urbana (MENEZES FILHO, 2007).

No decorrer de 20 anos, a ocupação do solo se tornou intensa e a criação do Plano de Desenvolvimento Integrado de Goiânia em 1992, visando ser uma diretriz quanto ao ordenamento e ocupação do uso do solo, perdeu seu valor com a aprovação da Lei Nº7222 em

1994 e da Lei N°7715 em 1997, as quais desobrigavam a exigência de pavimentação asfáltica, propiciando um crescimento vertiginoso na aprovação de loteamentos (MOYSÉS, 2004).

Sendo assim, o desordenamento quanto ao uso e ocupação do solo favoreceu a urbanização desenfreada. Segundo Santos e Romão (2009), nesse processo de urbanização acelerado, foram ocupadas áreas de preservação permanente próximas aos cursos d'água. Esse fato modificou as condições naturais e gerou impactos que são sentidos pela população, como a poluição dos corpos d'água, processos de assoreamento, frequentes alagamentos das vias dentro da malha urbana, dentre outros.

Edificada em sua maior parte na bacia do Ribeirão Anicuns e densamente urbanizada, Goiânia atualmente enfrenta problemas relacionados à drenagem urbana. Apesar de possuir uma considerável quantidade de áreas verdes e ser exemplo na qualidade de vida, com apenas 78 anos já sofre da mesma forma que cidades centenárias no que se refere às enchentes e inundações.

Santos e Romão (2009) relatam que a porção sul de Goiânia apresenta grande quantidade de ocorrências de inundações, destacando-se nessa porção, bacias que apresentam altos níveis de ocupação e eventos de inundação associados, principalmente, aos córregos Cascavel e Botafogo, em diversos bairros.

A segregação sócio-espacial, onde áreas periféricas das cidades são ocupadas por uma população desfavorecida, levou, em Goiânia, à ocupação de áreas impróprias para fixação de moradias, inclusive áreas de preservação, tornando áreas de riscos ambientais. No entanto, a cidade também apresenta várias áreas com riscos relacionados à inundação em bairros nobres, como os setores que se instalaram na bacia do córrego Cascavel.

Goiânia tem dois períodos definidos: um seco, compreendido entre maio e setembro, e outro chuvoso, que vai de outubro a abril, período em que ocorrem as chuvas torrenciais provocando inundações, as quais podem ser naturais ou provocadas pela urbanização.

De acordo com Tucci (1999), as inundações provocadas pela urbanização ocorrem devido à impermeabilização das bacias hidrográficas urbanas. O efeito da urbanização no ciclo das águas se dá pela remoção da cobertura vegetal original e sua substituição por estruturas impermeáveis, resultando na redução da infiltração de água no solo e diminuição da evapotranspiração. Isso provoca aumento do escoamento superficial, que se traduz em condições de vazões de cheia dos cursos d'água urbanos. Já as inundações naturais são aquelas que fazem parte da dinâmica natural de uma drenagem. Ocorre porque áreas naturalmente inundáveis foram ocupadas.

Contudo, o município de Goiânia é marcado pelo intenso incremento populacional, o qual causou uma concentração do espaço urbano, refletida na verticalização de várias regiões. Diante dessa alteração, nos últimos 20 anos, resultou em vários eventos críticos relacionados com a chuva, os quais levaram a diversos transtornos vivenciados pela população goiana. A **Tabela 2.4** apresenta, como exemplo, alguns eventos e suas consequências.

**Tabela 2.4** – Alguns eventos e suas consequências em Goiânia (CORRENTINO, 2007).

| DATA     | EVENTO                                                                                      | CONSEQUÊNCIA                                                                                                                               |
|----------|---------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 25/11/93 | Chuva de 41mm (19:30 às 21:30h)                                                             | Causou transtornos à população dos setores Sul, Bueno, Oeste e Jardim América.                                                             |
| 07/03/97 | Chuva de 80mm (45min)                                                                       | Provocou forte inundação e estragos no final da Av. Portugal com Al. das Rosas.                                                            |
| 22/02/04 | Chuva que caiu na madrugada                                                                 | Provocou transbordamento do Rio Meia Ponte em cinco bairros (Urias Magalhães, Vila Roriz, Vila Monticeli, Vila Coronel Cosme e Setor Jaó). |
| 27/09/06 | Chuva de 109mm (do dia 27 para dia 28, com maior intensidade no dia 27 das 18:00 às 20:00h) | Inundou a Av. T-9 na baixada do Córrego Vaca Brava.                                                                                        |
| 04/01/07 | Chuva intensa (17:50 às 18:45h)                                                             | Provocou inundação do Córrego Vaca Brava, na Av. T-9 e nas margens do Ribeirão Anicuns.                                                    |

As inundações nas cidades, além de trazer prejuízos físicos como perdas materiais, podem causar muitos problemas de saúde através da contaminação por doenças de veiculação hídrica, principalmente nos locais onde há falta de saneamento básico. Podem, também, provocar surtos de dengue e morte de pessoas que vivem em áreas de risco devido aos processos erosivos e deslizamento de encostas, além de aumentar o risco à saúde e poluição dos mananciais. Sendo assim, torna-se necessário, desta forma, implementar medidas sustentáveis nos espaços antropicamente ocupados, além de controlar o crescimento acelerado e desordenado dos municípios, como é o caso do município de Goiânia.

## 2.2 POLUENTES

A água é um recurso natural que reflete as alterações do meio, sejam elas de origem natural ou antrópica. A grande diferença entre essas duas causas, porém, está não somente nas suas origens, mas também na possibilidade das mesmas em serem revertidas. As interferências advindas das atividades antrópicas, o que se convencionou chamar de “poluição”, são detentoras de um caráter muito mais singular e delicado, uma vez que introduzem no meio hídrico, na maioria das vezes de forma contínua, algumas substâncias que nunca estiveram ali presentes ou que existiam em quantidades pequenas; além disso, esses elementos, uma vez introduzidos no ambiente, necessitam da interferência humana para serem removidos do mesmo (BÁRBARA, 2006).

A poluição hídrica, segundo Lima (2001), é a decorrência de qualquer mudança na qualidade física, química, radiológica ou biológica da água, causada diretamente pelo homem ou por suas atividades, e que pode ser prejudicial ao uso presente, futuro ou potencial desse recurso natural.

As cargas de poluição associadas às águas pluviais podem ser significativamente maiores do que aquelas encontradas nos esgotos domésticos (CORDERY, 1997). Estas cargas podem causar a degradação dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos, e podem causar sérios problemas nos sistemas de drenagem e dificultar as atividades tradicionais de tratamento.

A geração da poluição nas águas pluviais é um processo complexo que engloba um grande número de fatores relevantes. Segundo Deletic *et al.*, (2000), os fatores principais que influenciam na acumulação dos poluentes na superfície são: deposição de poeira, tráfego, vento e a erosão de áreas não pavimentadas. O carregamento dos poluentes das superfícies é causado pela precipitação e pelo escoamento, etapas que ocorrem acima da superfície. Sequencialmente, as águas poluídas seguem para os sistemas de drenagem, onde os seguintes processos podem ocorrer: deposição dos sedimentos no leito da boca de lobo, suspensão dos sedimentos no fluido ou carregamento dos sedimentos dependendo da taxa de escoamento. Finalmente, as águas escoam para os arroios, rios ou lagos produzindo efeitos imediatos e cumulativos da poluição.

Conforme Greenway *et al.*, (2002), a quantidade e os tipos de poluentes carregados no escoamento pluvial irá variar de acordo com o uso do solo, a intensidade e a duração dos eventos de precipitação e do período entre esses eventos. O uso do solo pode ser um indicativo dos tipos e concentrações de poluentes. A intensidade e duração dos eventos de precipitação auxiliam no arraste e no transporte de poluentes até os cursos de água. O período entre os eventos de precipitação também afeta a qualidade e a quantidade do escoamento pluvial devido à acumulação de contaminantes nas superfícies impermeáveis entre os eventos.

Matos *et al.*, (1998) descrevem que, de forma geral, em ambientes urbanos, os parâmetros poluentes mais representativos na drenagem parecem ser as partículas (sólidos em suspensão), os metais (sobretudo chumbo, zinco e ferro) e os hidrocarbonetos.

Como escoamento de águas pluviais urbanas tem sido identificado como uma das principais causas de poluição, é de extrema importância identificar as fontes desses tipos específicos de poluentes em uma microbacia urbana. As zonas urbanas geram poluentes como

metais pesados, relacionados ao uso do solo e do volume de tráfego na bacia (ESTEBE *et al.*, 1997).

Outros poluentes das águas urbanas também apresentam importância significativa. Alguns indicadores físicos, químicos e biológicos foram pré-definidos, pelos órgãos ambientais, a fim de elencar mecanismos de acompanhamento da qualidade da água. Esses indicadores, chamados de parâmetros de qualidade da água, consistem em turbidez, pH, alcalinidade, sólidos suspensos, coliformes totais e termotolerantes, HPAs, metais, entre outros, que analisados em conjunto possibilitam verificar os níveis de poluição.

Nos subitens que se seguem, fez-se uma breve caracterização dos poluentes analisados no presente estudo.

### 2.2.1 Potencial hidrogeniônico

De acordo com Lima (2001), o potencial hidrogeniônico (pH) pode variar seu valor na faixa de sete a quatorze e representa o equilíbrio entre os íons  $H^+$  e  $OH^-$ . Se abaixo de sete, a água é tida como ácida; se acima, alcalina; e, caso seu valor se mantenha na faixa de sete, é tida como neutra. O potencial hidrogeniônico é formado pela presença de sólidos e gases dissolvidos no meio hídrico que, por sua vez, são oriundos da dissolução de rochas, absorção de gases da atmosfera, oxidação da matéria orgânica, fotossíntese e, em especial, dos efluentes de origem antrópica. Em termos de concentração de íons  $H^+$ , o pH é definido como o logaritmo negativo da concentração molar de íons de hidrogênio, conforme pode ser observado na **Equação 2.1** (LIMA, 2001).

$$pH = -\log[H^+] \quad (2.1)$$

Um dos grandes problemas associados à poluição atmosférica é a diminuição do pH da água da chuva, através de um processo denominado chuva ácida. O menor valor de pH



esperado para a água pura, com gás carbônico dissolvido, até a concentração de saturação, é de 5,6. Em locais com concentrações elevadas de óxidos de enxofre e óxidos de nitrogênio na atmosfera, esses se combinam com o vapor d'água e formam os ácidos sulfúrico e nítrico, reduzindo o pH a valores inferiores a 5,6, sendo que já foram registrados na literatura valores baixos como 2,7. A chuva ácida danifica o ecossistema aquático, diminuindo, por exemplo, a população de peixes, além de prejudicar a vegetação.

### **2.2.2 Turbidez**

A turbidez é uma característica física que traduz a resistência oferecida pela água à passagem dos raios luminosos. A turbidez da água é devida à presença de materiais sólidos em suspensão que reduzem a sua transparência. Pode ser provocada também pela presença de algas, matéria orgânica e outras substâncias como o zinco, ferro e areia, resultantes do processo natural ou antrópico, conferindo às águas uma estética indesejável.

É a alteração da penetração da luz pelas partículas em suspensão, que provocam a sua difusão e absorção. O aumento da turbidez reduz a zona eufótica, que é a zona de luz onde a fotossíntese ainda é possível ocorrer (MACÊDO, 2001).

A erosão das margens dos rios em estações chuvosas é um exemplo de fenômeno que resulta em aumento da turbidez das águas. De acordo com Menezes (2004), a urbanização leva a taxas aceleradas de erosão, principalmente nos locais onde se instalam novos empreendimentos, em abertura de vias e novos loteamentos, dependendo, também, das características do solo. Maiores taxas de erosão significam maiores arrastes e, portanto, maior quantidade de sedimentos que chegarão aos cursos d'água. Excesso de sedimentos é, talvez, a mais visível forma de poluição difusa. Como consequência tem-se o assoreamento, ou alteração das características hidráulicas do corpo d'água, alterações na fauna e flora aquática e deterioração dos aspectos estéticos do curso d'água. O sedimento, por si só, já se constitui em poluente por afetar a vida

aquática, aumentando a turbidez da água. Além disso, são transportadores de outros poluentes, como metais e outros tóxicos, que são por eles adsorvidos.

A análise baseia-se na leitura da turbidez, ou seja, da quantidade de matéria suspensa e dissolvida na amostra. Atualmente se utilizam os métodos denominados nefelométricos, que consistem em equipamento (turbidímetro) com luz de tungstênio e detectores fotoelétricos, capazes de detectar a luz que é dispersa num ângulo de 90°C com a luz incidente. A unidade de turbidez passou a ser denominada de “unidades nefelométricas de turbidez” – UNT (MACÊDO, 2001).

### **2.2.3 Alcalinidade**

Alcalinidade de uma água é sua capacidade em neutralizar ácidos, ou seja, sua capacidade de tamponamento. Usualmente, as substâncias mais comuns encontradas em águas de superfície causadoras de alcalinidade são os carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos. Uma água pode ter baixa alcalinidade e alto valor de pH e, vice-versa.

### **2.2.4 Sólidos suspensos**

Os sólidos suspensos referem-se a pequenas partículas sólidas que se mantêm em suspensão em água, como um colóide ou devido ao movimento da água. Segundo Herngren (2005), são provenientes de áreas impermeáveis e permeáveis em uma bacia hidrográfica, resultando em entupimento de canais e sufocamento da fauna e flora que vive no fundo dos corpos d'água. No entanto, além desses prejuízos, o seu mais grave impacto é insidioso. Funcionam como substratos móveis para outros poluentes, tais como metais pesados.

Neste sentido, as menores partículas são motivo de preocupação devido à sua área de superfície relativamente alta, que leva a um aumento de adsorção de poluentes (LIEBENS, 2001). O autor relata, ainda, que fontes antropogênicas contribuem com uma maior quantidade de partículas finas que fontes naturais em ambientes urbanos. Consequentemente, partículas finas desempenham um papel importante como ferramenta de transporte de poluentes em escoamento das áreas urbanas.

Assim, a qualidade da água de drenagem pode ser comprometida significativamente pela alta carga de sedimentos. Pechacek (1994) relata que a afinidade de adsorção de uma partícula sólida varia com o tamanho, estrutura e propriedades físico-químicas, como a condutividade elétrica da partícula. As variações de tamanho das partículas são atribuídas aos diferentes usos do solo e características topográficas. No entanto, torna-se necessário considerar o local específico (características do solo, limpeza da área, etc.) e os vários fenômenos associados à poluição das águas pluviais urbanas.

A presença de sólidos de qualquer natureza na água provoca a elevação da turbidez e a diminuição da transparência, podendo afetar a biota aeróbia e facultativa devido à diminuição da produção fotossintética e, consequentemente, do oxigênio dissolvido no meio hídrico (BÁRBARA, 2006).

### **2.2.5 Coliformes totais e termotolerantes**

Os microrganismos desempenham funções de importância no ambiente aquático, principalmente no tocante à oxidação da matéria orgânica presente na água. Alguns desses seres podem ser patogênicos. Porém, os ensaios que detectam a presença das bactérias nocivas ao homem não conseguem obter precisão em número de indivíduos, em razão das baixas concentrações desses organismos (SEMA/SP, 2000). Por isso, estabeleceu-se que a determinação da potencialidade de um corpo hídrico ser portador de agentes causadores de doenças seja feita de forma indireta, por meio de seres indicadores de contaminação de origem fecal, o chamado “grupo dos coliformes”.

Segundo Rodrigues *et al.*, (2002), os coliformes são seres presentes em elevadas quantidades nas fezes humanas e de animais de sangue quente. Em média, uma pessoa lança, por dia, em suas fezes, cerca de um trilhão desses microrganismos no esgoto. O grande problema, contudo, é que os coliformes também ocorrem, embora em menores quantidades, nos ambientes naturais, principalmente no solo. Por isso, a interpretação desta análise deve ser feita com cautela, para que não sejam tiradas conclusões precipitadas a respeito da poluição hídrica.

O risco de contaminação das águas superficiais e subterrâneas é dependente de suas concentrações no escoamento de águas pluviais (PITT *et al.*, 1994).

Os níveis detectados nas águas pluviais são altamente variáveis, dependendo, principalmente, da fonte do escoamento superficial (BANNERMAN *et al.*, 1996). Níveis elevados são encontrados, principalmente, quando resíduos humanos e animais estão presentes no escoamento.

A presença de coliformes termotolerantes no corpo receptor prejudica seu uso para recreação, pesca, irrigação e abastecimento humano. A presença nas águas de drenagem urbana ocorre devido a ligações clandestinas, vazamento de fossas sépticas, esgoto que transborda na superfície do asfalto pelos poços de visita ou dejetos de animais. Embora a contaminação indicada pela presença desses microrganismos de origem fecal seja de curto prazo, visto que sua morte ocorre de forma relativamente rápida quando livres na água, sabe-se que elas são adsorvidas no sedimento, o que resulta em taxas menores de mortalidade, pois, junto ao lodo do fundo, as bactérias são protegidas da ação destrutiva dos raios solares e, ainda, encontram teores altos de nutrientes necessários à sua sobrevivência.

### 2.2.6 Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos – PAH's

Os PAH's são compostos fundidos construídos em anéis de benzeno. Muitos PAH's possuem alta estabilidade devido às propriedades benzênicas. O interesse em PAH's em estudos ambientais decorre do fato que eles foram encontrados causando efeitos tóxicos agudos letais e subletais em organismos de água doce em concentrações muito baixas na água (WARREN *et al.*, 2003).

Compostos orgânicos, tais como gasolina, ésteres, solventes industriais e tintas têm sido detectados em águas pluviais e representam riscos à saúde humana e dos ecossistemas. As fontes concentradas desses compostos incluem estacionamentos, postos de gasolina, áreas industriais, áreas de serviço veicular e áreas de tráfego intenso (BALOUSEK, 2003).

Escoamento de águas pluviais em áreas experimentais tem identificado muitos compostos orgânicos. Compostos orgânicos no escoamento de águas pluviais dessas áreas, quando infiltrados, podem percolar rapidamente, causando contaminação das águas subterrâneas (CENTER FOR WATERSHED PROTECTION, 2000).

Devido ao seu impacto negativo, PAH's são incluídos na USEPA como poluentes prioritários, alguns dos quais são considerados possíveis ou prováveis cancerígenos humanos. Por isso, sua distribuição no ambiente e potencial risco para saúde humana tem sido o foco de muita atenção (MANOLI e SAMARA, 1999).

Segundo Warren *et al.*, (2003), contaminantes hidrofóbicos como os PAH's podem existir em uma variedade de formas na água: uma fase livre dissolvida, uma fase coloidal ou associados com material sedimentar. A distribuição de PAH's entre as diferentes fases é uma questão central em termos de destino e efeitos de PAH's em ambientes aquáticos. Influencia fortemente concentrações nas fases dissolvidas e particuladas e, portanto, tem um forte impacto na qualidade da água. A fim de compreender e prever sua distribuição, é fundamental analisar sua influência e importância nos processos de acúmulo e carregamento em ambientes urbanos.

### 2.2.7 Metais

A comunidade científica tem dado muita atenção em metais pesados na investigação de contaminação das águas superficiais e subterrâneas. Esta atenção é mais provável devido ao fato que metais pesados podem ser altamente tóxicos aos seres humanos e outros animais, e são comumente detectados em níveis elevados no escoamento de águas pluviais. Fontes comuns de metais pesados são estacionamentos, ruas, postos de gasolina e telhados (BANNERMAN *et al.*, 1996).

Barraud *et al.*, (1999) dizem que embora os metais são em grande parte mantidos próximo à superfície do solo, a infiltração das águas pluviais durante longos períodos de tempo pode levar a acumulações significativas de metais e à poluição do solo.

Um metal que não permanece facilmente unido às partículas do solo é o zinco. A retenção de zinco nas camadas superiores do solo é baixa (PITT *et al.*, 1994). Isto leva a uma grande preocupação, pois o zinco é encontrado em níveis elevados no escoamento de águas pluviais. A combinação de mobilidade e abundância no escoamento de águas pluviais torna um grande risco de contaminação das águas superficiais e subterrâneas.

Metais pesados são preocupantes devido seu potencial tóxico. Além disso, a maioria dos metais pesados tem baixa solubilidade e natureza hidrofóbica, o que os fazem unir a partículas finas. Por isso, a maioria dos metais pesados são facilmente transportados pelo escoamento urbano para as águas receptoras. Escoamento de águas pluviais de áreas urbanas contém quantidades significativas de elementos de metais e sólidos (BUCHBERGER *et al.*, 1997).

Portanto, a compreensão dos processos de acúmulo e carreamento de metais em meio urbano é de fundamental importância. De acordo com Sansalone e Buchberger (1997), os metais pesados têm sido primariamente reconhecidos como poluentes associados ao tráfego. No entanto,

um grande número de fontes adicionais de metais em ambientes urbanos também foi listado na literatura, conforme demonstrado na **Tabela 2.5**.

**Tabela 2.5** – Fontes de metais pesados em um ambiente urbano (DRAPPER *et al.*, 2000).

| <b>FONTE</b>                       | <b>Pb</b> | <b>Zn</b> | <b>Cd</b> | <b>Cu</b> | <b>Ni</b> | <b>Cr</b> | <b>Mn</b> | <b>Fe</b> | <b>Al</b> |
|------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Combustível e escapamento          |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| Pneus                              |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| Freios                             |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| Desgaste do motor                  |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| Desgaste de componentes veiculares |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| Pintura                            |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
| Solo                               |           |           |           |           |           |           |           |           |           |

Os metais pesados, como cádmio, cobre, chumbo, cromo, níquel, zinco, entre outros, aparecem com maior frequência tendo, como fonte principal, os veículos automotores. Entretanto, destaca-se, ainda, a presença dessas substâncias nas tintas, materiais galvanizados e tubulações metálicas. Ball *et al.*, (1998) relatam que em várias outras fontes, como pesticidas e pavimentação asfáltica, também foram encontrados metais, contribuindo para o acúmulo em áreas urbanas.

A presença de metais pesados no escoamento superficial urbano é nociva aos ecossistemas aquáticos e prejudica o uso dos cursos d'água receptores para irrigação, recreação e abastecimento humano. Wanielista e Yousef (1993) dizem que o impacto causado pela presença dessas substâncias é de curto prazo quando avaliado pelos índices de mortalidade provocada após seu lançamento. Os efeitos de longo prazo são mais difíceis de serem avaliados e, usualmente, levam a danos fisiológicos que alteram crescimento e taxas de reprodução, tornando as populações mais suscetíveis a doenças.

Vários poluentes tóxicos, como os metais pesados, apresentam a chamada bioacumulação, ou ampliação biológica, fenômeno que leva ao aumento da concentração da substância no tecido dos organismos, nos níveis mais elevados da cadeia alimentar, sendo que a ingestão desses organismos pelo homem pode causar graves danos à saúde.

Contudo, a identificação e controle de poluentes, como os metais, é particularmente importante, devido à natureza tóxica desses compostos. Além disso, Estebe *et al.*, (1997) relatam que metais tem sido apontados como principais causas da degradação das águas de escoamento urbano.

## 2.3 ACÚMULO E CARREAMENTO DE POLUENTES

### 2.3.1 Acúmulo - Build-up

Build-up é definido como o acúmulo de poluentes em superfícies, expresso em  $\text{g/m}^2$ , durante períodos secos que antecedem eventos de precipitação (HERNGREN, 2005). Os poluentes têm por origem uma variedade de atividades antropogênicas e fenômenos naturais em um ambiente urbano. Os poluentes acumulados serão, posteriormente, lavados pela chuva e o escoamento superficial transporta os poluentes para as águas receptoras.

O processo de acumulação representa toda uma variedade de processos típicos de tempo seco que ocorrem entre os eventos de precipitação, incluindo fenômenos como deposição, erosão devido à ação do vento, processo de limpeza das ruas, etc. Cada um destes processos induz a uma acumulação de sólidos na superfície e, também, de outros poluentes que são carregados durante os eventos de precipitação (DOTTO, 2006).

Segundo Rogge *et al.*, (1993), as fontes naturais variam significativamente dentro das bacias e incluem material acumulado nos solos circundantes, deposição atmosférica seca e



molhada e insumos biológicos de vegetação. Quantidades significativas de partículas podem ser atribuídas a fontes antrópicas, tais como processos industriais, emissões dos veículos e desgaste do pneu e da superfície da via.

Em áreas urbanas, partículas derivadas de automóveis e solos locais foram identificadas como principais fontes de acúmulo de poluentes em uma superfície pavimentada (TAI, 1991). No entanto, a importância relativa dessas fontes depende significativamente das características locais, como a fração das superfícies impermeáveis e as condições de tráfego.

De acordo com Stadelmann (2002), a contribuição de fontes antropogênicas ao build-up é altamente variável dentro de áreas urbanas, devido à quantidade de fatores físicos e o material depositado. O build-up em superfícies pavimentadas, tanto de fontes naturais como antropogênicas, é dependente de fatores primários, tais como: (1) clima, incluindo chuva e vento; (2) uso do solo; (3) densidade populacional; (4) porcentagem de área impermeável; (5) características de tráfego; (6) período seco antecedente; (7) práticas de limpeza de rua; e (8) tipo de solo.

Segundo James *et al.*, (1999), build-up é uma função linear relacionada ao tempo. Os dados utilizados na formulação padrão do SWMM assume uma acumulação linear. No entanto, há ampla evidência de que build-up pode ser não-linear, logo a escolha da melhor forma funcional não é óbvia. O programa oferece quatro opções de build-up de poluentes, a saber:

(1) Linear:

$$A = a + bd \quad (2.1)$$

(2) Potencial:

$$A = ad^b \quad (2.2)$$

(3) Exponencial:

$$A = a (1 - e^{-bd}) \quad (2.3)$$

(4) Michaelis-Menton:

$$A = ad / (b + d) \quad (2.4)$$

Onde:

a,b: coeficientes empíricos;

A: acúmulo (build-up) na superfície ( $\text{g/m}^2$ );

d: dias secos antecedentes.

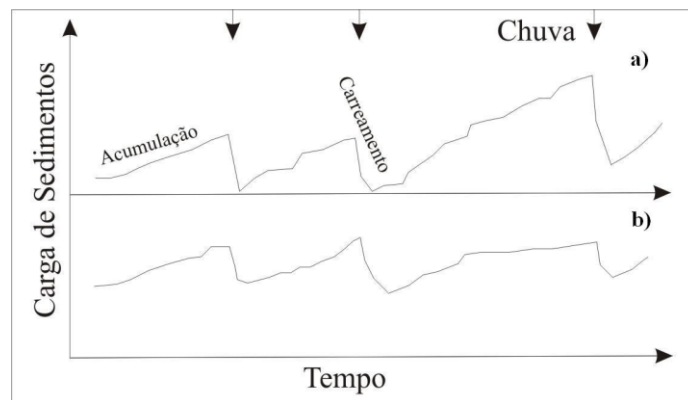
Valores apropriados para os dois coeficientes empíricos de acúmulo são essenciais para replicação matemática. A derivação dos valores dos coeficientes usando dados observados a partir do estudo pode ser realizada utilizando o método dos mínimos quadrados.

O processo no qual o sedimento acumula-se na superfície ainda é uma questão de conjectura. Butler e Clark (1995) assumem que a acumulação dos sedimentos na superfície é linear, a menos que sofra interferência da precipitação ou do processo de limpeza urbana.

Duncan (2003) concluiu que a acumulação em superfícies impermeáveis pode ser descrita como um processo de equilíbrio dinâmico agindo entre a deposição e a remoção em um ponto e entre as áreas de contribuição ou não. O processo de acumulação é mediado pelo vento natural e pelo vento induzido através do tráfego de veículos, e é principalmente um processo característico de períodos secos.

Vaze e Chiew (2002), num estudo realizado para avaliar a acumulação de poluentes em uma rodovia urbana, em Melbourne, na Austrália, apresentaram duas hipóteses quanto ao processo de acumulação de sedimentos. A primeira, mais aceita nos modelos de qualidade da

água, assume que a carga de poluentes acumula-se a partir do zero ao longo de um período de dias secos. Neste caso, praticamente toda a carga de poluentes é carregada durante os eventos de precipitação (**Figura 2.2-a**). A segunda concepção é de que os eventos de precipitação removem apenas uma pequena quantidade dos sedimentos presentes na superfície e que a acumulação destes ocorre relativamente rápida após um evento, e também que ao longo dos dias secos a quantidade de sedimentos tende a retornar ao nível existente antes do evento (**Figura 2.2-b**). Esta abordagem e a relevância da redistribuição dos sedimentos ao longo dos dias secos resultariam em uma quantidade praticamente uniforme de sedimentos ao longo da superfície durante diferentes períodos.



**Figura 2.2** – Representação hipotética do processo de acumulação e carregamento dos sedimentos ao longo do tempo (VAZE e CHIEW, 2002).

Os autores constataram também que a acumulação de poluentes ao longo de dias secos ocorre relativamente rápida após um evento de precipitação, mas torna-se lenta depois de alguns dias.

O processo de acumulação pode ser quantificado diretamente pela coleta dos sedimentos das superfícies sob as condições de controle previamente definidas. Outra alternativa é a estimativa indireta através da modelagem ou análise estatística das cargas encontradas no escoamento. Não é possível medir diretamente no escoamento, uma vez que as cargas encontradas no escoamento são resultantes do efeito integrado dos processos de acumulação e carregamento (DOTTO, 2006).

### 2.3.1.1 Build-up de metais

Numerosas fontes de metais estão presentes em um ambiente urbano. No entanto, a sua quantificação é extremamente difícil. Variações no acúmulo de concentrações de metais têm sido relatadas, sugerindo que a interferência e importância relativa destas fontes variam no ambiente urbano (DAVIS *et al.*, 2001).

Estas variações são atribuídas a fatores, como períodos antecedentes de seca e características do uso do solo. Além disso, a variabilidade não parece ser afetada por um único fator, mas por vários fatores que interagem. Vermette *et al.*, (1991), por exemplo, observaram o período antecedente de seca e limpeza anterior da rua, bem como a direção do vento, durante amostragem da concentração do acúmulo de metais.

Período antecedente de seca é importante devido à maioria dos metais apresentarem baixa solubilidade e a afinidade dos metais com sedimentos (YUAN *et al.*, 2001).

Da mesma forma, o uso do solo tem sido sugerido como tendo um papel importante no acúmulo de metais pesados. Brezonik e Stadelmann (2002) constataram que o uso comercial e industrial do solo, em Minnesota - USA, contribuiu com uma maior quantidade de metais do que uma área residencial.

Resultados semelhantes foram encontrados por Droppo *et al.*, (1998) em uma bacia em Ontario - EUA, onde as concentrações totais de Pb, Cu, Cd, Zn e Mn apresentaram as maiores concentrações na parte industrial da bacia. Isto não é surpreendente, uma vez que Cu, Cd, Zn e Mn têm sido atribuídos ao aumento produtivo das indústrias.

Elevadas concentrações de metais em áreas comerciais é mais provável devido ao aumento na densidade de tráfego comparado às áreas residenciais. Isto é atribuído aos metais,

como Pb e Cr, que têm sido encontrados em áreas específicas dependendo da densidade do tráfego (YUN *et al.*, 2000).

Similarmente, Shaheen (1975) mostrou que quase 100% de Pb que entra nas águas receptoras originavam de fontes relatadas de tráfego. No entanto, devido ao aumento no uso de combustível sem chumbo nas últimas duas décadas, isto é questionável e deve ser interpretado cuidadosamente.

Uma das fontes mais comuns de Cu e Zn foi encontrada em pastilha de freio e desgaste dos pneus (DRAPPER *et al.*, 2000). Assim, atribui-se a alta carga de poluentes a menores frequências de manutenção dos veículos e más condições das vias.

### **2.3.2 Carreamento - Wash-off**

Segundo James *et al.*, (1999), wash-off é o processo de erosão ou solução de elementos de uma superfície durante um período de escoamento.

Os poluentes são incorporados ao escoamento das águas pluviais através de processos de carreamento. O carreamento de poluentes é influenciado pela quantidade de poluentes disponíveis, que por sua vez, é determinado pelo processo de acúmulo. Assim, acúmulo e carreamento de poluentes mostram uma forte interação (HERNGREN, 2005).

Segundo Andral *et al.*, (1999), o carreamento é dependente de parâmetros, como a duração da precipitação, o escoamento superficial e o material acumulado. Assim, há uma série de fatores físicos e químicos envolvidos na carga de poluição em uma superfície pavimentada.

Influência das características da chuva no carreamento de poluentes é importante devido a dois processos primários. Primeiramente, como a chuva atinge o solo, ela inicialmente molha a superfície e começa a dissolver poluentes solúveis em água. O impacto das gotas da

chuva e o fluxo laminar horizontal fornece a turbulência necessária para dissolver a fração solúvel. Em segundo lugar, os poluentes desprendem com o resultado do impacto da chuva e são carregados por escoamento superficial. Dependendo da intensidade e duração da chuva, parte da carga poluente superficial disponível vem desintegrada e/ou dissolvida (VAZE *et al.*, 1997).

O desenvolvimento de modelos de qualidade da água está intimamente ligado à quantidade de água. Compreender a relação entre qualidade da água e quantidade da água é importante por duas razões principais. Primeiramente, na maioria dos modelos de qualidade da água, concentração de poluentes e carga poluente não pode ser estimada sem a estimativa do fluxo. O fator fluxo em poluição de escoamentos urbanos tem sido identificado como a força motriz na mobilização, transporte e deposição de poluentes devido ao efeito sobreposto de uma bacia urbanizada em características de fluxo. Em segundo lugar, os procedimentos para reduzir os problemas de quantidade de água e qualidade de água também são, muitas vezes, complementares (ZOPPOU, 2001).

Duncan (1995) cita que a carga de carregamento de poluentes varia ao longo do evento de chuva em função da intensidade da chuva. Assim, funções de carregamento, lineares ou exponenciais, não podem simular um aumento na concentração de poluentes em qualquer momento durante a chuva.

Segundo Chiew e McMahon (1999), o carregamento (wash-off) é influenciado pela intensidade e duração da chuva. Esses dois parâmetros estão altamente relacionados um com o outro e, portanto, o grau de influência que eles exercem individualmente não está claramente discernido. Assim, intensidade e duração da precipitação são variáveis importantes para análise de carregamento.

James *et al.*, (1999) citam que uma relação exponencial pode ser desenvolvida para descrever a forma de wash-off. Carregamento (wash-off) de poluentes de uma superfície impermeável é comumente replicada como uma equação exponencial, segundo Egodawatta, Thomas e Goonetilleke (2009), na forma de:

$$M_a = M_0(1 - e^{-kt}) \quad (2.5)$$

Onde:

$M_a$ : massa do material acumulado no tempo  $t$ ;

$M_0$ : massa inicial do material na superfície;

$k$ : coeficiente de wash-off;

$t$ : tempo.

Diferentes derivações desta equação podem ser usadas em vários modelos de qualidade das águas pluviais, como o Stormwater Management Model (SWMM).

#### 2.3.2.1 Wash-off de metais

Metais carregados por águas pluviais urbanas são divididos em uma fração dissolvida e uma particulada. No entanto, a distribuição de metais pesados em águas pluviais urbanas é difícil prever, pois depende de uma variedade de fatores associados com influências antropogênicas de metais, como a origem da poluição, concentração e características de suspensão, ligantes coloidais e dissolvidos e mudanças em parâmetros físico-químicos na água (GUEGUEN e DOMINIK, 2003).

Também foi constatado que quanto mais os sedimentos ficam em suspensão aquosa, maior o grau de adsorção e/ou dessorção de poluentes (DONG *et al.*, 1984).

Segundo Ujevic *et al.*, (2000), geralmente, elementos de metais, em ambientes urbanos, dividem em frações dissolvidas e ligadas às partículas de escoamento, em função de: (1) pH; (2) solubilidade do elemento metal; (3) concentração de sólidos; (4) origem da poluição; (5) tempo de permanência no pavimento; (6) volume do escoamento; (7) período de seca antecedente; (8) carbono orgânico dissolvido; (9) condições de redução; e (10) forma química.

Estes fatores apontam as incertezas na literatura em relação às diferentes cargas e concentrações de metais notadas por muitos pesquisadores. Por exemplo, Morrison *et al.*, (1984) encontraram altos níveis de Cu em sólidos de águas pluviais, que pode ser devido a alta porcentagem de matéria orgânica particulada registrada. Bubb e Lester (1993) encontraram Cu e Zn estando principalmente ligados às partículas, enquanto Shinya *et al.*, (2000) encontraram Ni estando geralmente associado com a fase dissolvida. Legret e Pagotto (1999) constataram que o Pb geralmente aparece na forma particulada (91%) enquanto os outros metais investigados estão geralmente dissolvidos (60% para Zn, 56% para Cu e 54% para Cd).

A associação com a fração dissolvida por metais, como Cu, Zn e Ni não é surpreendente, desde que eles foram encontrados fortemente complexados por ligantes orgânicos (QU e KELLERMANN, 2001). Consequentemente, eles podem interagir em solução com matéria orgânica dissolvida, que por sua vez, está concentrada pela adsorção a partículas finas, como minerais de argila. A associação de Cd com a fase dissolvida é, provavelmente, devido à sua dissociação através da troca de cátions e fases facilmente redutível. Assim, Cd, Cu e Zn são suscetíveis a serem transportados na fase dissolvida em escoamento de águas pluviais e serem diretamente biodisponíveis, quando atingem as águas receptoras.

No entanto, a maioria dos metais em escoamento de águas pluviais urbanas estão fortemente ligados aos sólidos suspensos, devido à sua baixa solubilidade (UJEVIC *et al.*, 2000). Elementos diferentes de metal são distribuídos diferentemente em escoamentos urbanos.

De acordo com Liebens (2001), concentrações de metais geralmente aumentam com a diminuição do tamanho das partículas. Isto é devido à área de superfície relativamente grande de sedimentos finos e sua maior capacidade de sorção. O enriquecimento de metais em partículas finas é um grande problema ambiental, pois nenhuma técnica de remoção eficiente para partículas finas é conhecida. Partículas grossas podem ser facilmente removidas por tanques de decantação e varrição de ruas. Pesquisadores, como Sutherland *et al.*, (1998), mostraram que varrição de ruas é eficaz apenas para partículas de tamanho maiores que 250µm. Como a maioria dos metais tem uma afinidade maior por partículas de tamanhos menores, programas convencionais de limpeza teriam pouco efeito na redução de níveis tóxicos do escoamento.



No entanto, altas concentrações de metais têm sido, ocasionalmente, encontradas nas frações grossas dos sólidos, como relatado por Dong *et al.*, (1984), sugerindo investigações criteriosas para obter resultados precisos. Mudanças nas condições urbanas e ambientais podem levar à liberação de diferentes metais no carreamento das águas pluviais.

### 2.3.3 Concentração Média do Evento - CME

A concentração de um parâmetro de qualidade de água é denominada de “concentração média do evento” (*event mean concentration*) (THOMSON *et al.*, 1997).

A CME é calculada como sendo a massa total ( $M_T$ ) do poluente dividida pelo volume total ( $V_T$ ) do escoamento superficial (**Equação 2.6**), para um evento de duração  $t_r$  (LEE *et al.*, 2001).

$$CME = \bar{C} = \frac{M_T}{V_T} \quad (2.6)$$

A massa total ( $M_T$ ) de um poluente transportada por um evento de duração  $t_r$ , é definida como:

$$M_T = \int_0^{t_r} C(t)Q(t)dt \quad (2.7)$$

Onde:

$C(t)$  – concentração variável no tempo;

$Q(t)$  – deflúvio variável no tempo.

O volume total ( $V_T$ ) do evento é definido como:

$$V_T = \int_0^{t_r} Q(t)dt \quad (2.8)$$

Com as equações 2.7 e 2.8, a concentração média do evento resulta como:

$$CME = \bar{C} = \frac{M_T}{V_T} = \frac{\int_0^{t_r} C(t)Q(t)dt}{\int_0^{t_r} Q(t)dt} \quad (2.9)$$

As funções reais  $C(t)$  e  $Q(t)$ , na prática, não podem ser encontradas a cada instante  $dt$ . Entretanto, as integrais na equação 2.9 podem ser estimadas, por aproximação ao considerar valores discretos, através de amostragens de campo. Assim, a equação 2.9 pode ser expressa como:

$$CME \cong \frac{\sum_{i=1}^{i=n} C_i Q_i \Delta t}{\sum_{i=1}^{i=n} Q_i \Delta t} \quad (2.10)$$

Onde:

$n$  – número de amostras;

$C_i$  – concentração discreta a cada tempo  $i$ ;

$Q_i$  – deflúvio discreto a cada tempo  $i$ ;

$\Delta t$  – intervalo de tempo do evento.

A aproximação da equação 2.9 à equação 2.10 será mais precisa quanto maior for o valor de  $n$ . Vale ressaltar que o valor de  $n$  está relacionado à viabilidade econômica e prática.

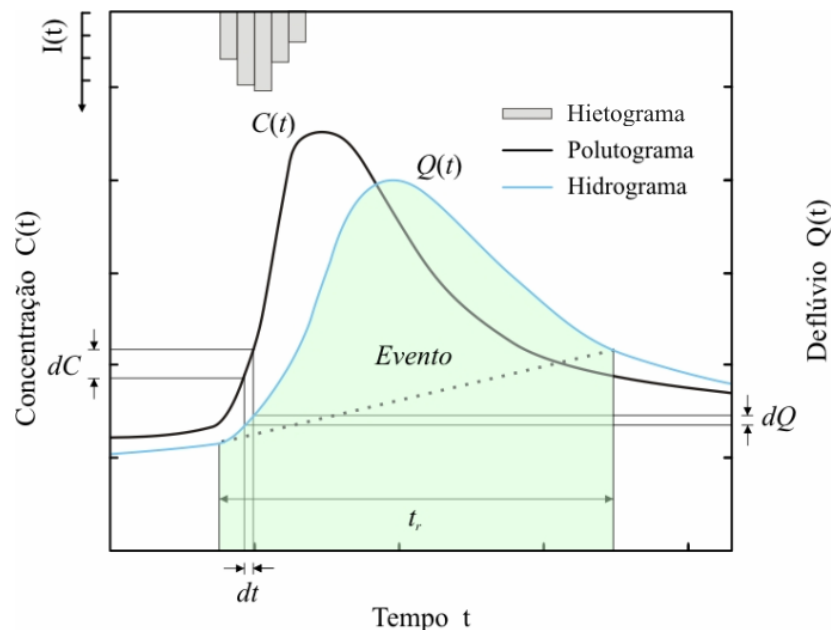
A CME representa uma concentração que resultaria se toda a descarga da drenagem pluvial fosse coletada em um único recipiente. Quando a CME é multiplicada pelo volume total da drenagem ( $V_T$ ) de um evento chuvoso, o produto resultante representa a descarga em massa total ( $M_T$ ) do constituinte naquele evento (THOMSON *et al.*, 1997).

Segundo Lee *et al.*, (2001), a utilização de uma CME é apropriada para avaliar os efeitos da drenagem pluvial em corpos d'água receptores. As respostas dos corpos d'água, ao receberem cargas poluidoras, são relativamente lentas para fluxos diretos das precipitações, quando comparadas com alterações provenientes de eventos chuvosos.

Amostras discretas podem não caracterizar o evento. Porém, a CME melhor caracteriza a qualidade da drenagem de forma integral. A aplicação da CME pode ser considerada como um índice de potencial poluidor do evento (NOVOTNY, 1992).

### 2.3.4 Polutograma

A variação dos parâmetros de qualidade de água da drenagem pluvial pode ser visualizada em função do tempo. O polutograma (*pollutograph*) (**Figura 2.3**), traduzido por Ide (1984), fornece a indicação do pico de concentração esperado e o tempo de duração do escoamento que afetará o corpo receptor, e relaciona a qualidade da água de escoamento com o respectivo volume a qualquer instante (OLIVEIRA, 2007).



**Figura 2.3** – Polutograma geral  
(OLIVEIRA, 2007).

## CAPÍTULO 3 – MATERIAIS E MÉTODOS

### 3.1 ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi realizado em doze parcelas asfaltadas, com dimensão de 3m<sup>2</sup>, situadas em um estacionamento público, onde foram realizadas as determinações de build-up e wash-off nos meses de junho e julho de 2012. Para wash-off foi utilizado um simulador de chuvas em três intensidades, a fim de atingir os objetivos propostos.

O estacionamento está localizado na Escola de Engenharia Civil da Universidade Federal de Goiás. O local escolhido foi uma área de estacionamento por ser considerado por diversos autores, como Pitt *et al.*, (1995), como uma das principais fontes de poluição urbana, onde se encontra grande parte dos metais no escoamento de água pluviais.

Os seguintes critérios foram ainda levados em consideração na escolha das parcelas:

- Condição da superfície lisa, sem fissura na parcela amostral;
- Boa acessibilidade para o uso do simulador de chuva;
- Menor perturbação ao tráfego local; e
- Inclinação suficiente para o fluxo por gravidade do escoamento, de forma que propiciava um fluxo regular das águas do simulador.

#### 3.1.1 Seleção dos pontos de amostragem

Foram selecionadas 12 parcelas amostrais na área analisada. Para tanto, dividiu-se a área total em três subáreas de análise (uma para cada período), e em cada subárea foram delimitadas 4 parcelas amostrais (uma para coleta do build-up e três para coleta do wash-off), totalizando 12 parcelas de amostragem.

As parcelas amostrais foram definidas buscando amostrar a área num todo e visando à necessidade de pontos estratégicos de acessibilidade do simulador, boa condição superficial e inclinação suficiente para coleta. A **Figura 3.1** demonstra a área selecionada para os procedimentos experimentais.



**Figura 3.1** – Área de estudo

## 3.2 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

### 3.2.1 Determinação do build-up

Foram realizadas três campanhas de amostragem, em período seco com dias intercalados, sendo a 1ª coleta realizada no dia 11/06/12, a 2ª no dia 19/06/12 e a 3ª no dia 04/07/12.

Em projetos de pesquisa de qualidade de água, a coleta do material depositado na superfície é comumente realizada usando um dos dois métodos: (1) escovação/varrição; e (2) aspiração/vácuo (ROBERTSON *et al.*, 2003).

Nesta pesquisa foi utilizado o de varrição/escovação. Este método foi preferível para a investigação, pois o método de aspiração pode levar a possíveis perdas de partículas na mangueira do aspirador e durante a transferência de amostras coletadas para os frascos de amostras. Sendo assim, as superfícies estudadas foram varridas cuidadosamente coletando o material depositado, conforme demonstrado na **Figura 3.2** abaixo, que posteriormente, foi utilizado para amostragem do build-up nas parcelas de estudo.



**Figura 3.2** – Coleta do acúmulo

Técnicas semelhantes têm sido utilizadas com sucesso em pesquisas precedentes, como Bris *et al.*, (1999), por exemplo. A varrição coleta uma amostragem representativa do acúmulo de poluentes na superfície, permitindo que, até mesmo os poluentes finos agregados à superfície, sejam soltos, caracterizando uma amostra mais representativa da parcela.

Para a amostragem do build-up foi coletada uma amostra em cada campanha. Devido à distância pequena entre as parcelas amostrais, a quantidade e a disponibilidade de poluentes depositados nas superfícies das parcelas amostrais assumiu ser a mesma para todas as parcelas. Essa suposição foi utilizada em pesquisas passadas, como Herngren (2005), por exemplo.

Parcelas amostrais de 2,0x1,5m foram delimitadas na superfície pavimentada, nos locais de coleta. Antes da coleta, características físicas e o período antecedente de seca foram registrados.

Após a varrição das superfícies, as amostras do build-up coletadas durante as três campanhas foram transferidas para garrafas de amostragem, por meio de uma pá, tomando os devidos cuidados para assegurar perda mínima de material durante a transferência, e assim, encaminhadas ao laboratório.

Nas análises laboratoriais, as amostras foram secas em estufa a 100°C por 24 horas para remover toda a umidade e, imediatamente, após retirada da estufa, cada amostra foi pesada em balança de precisão da marca Gehaka Série BG11, descontando a tara do cadinho utilizado para pesagem do material. Esse procedimento foi utilizado em outros trabalhos, como Dotto (2006), por exemplo.

Os resultados obtidos das análises foram utilizados para a quantificação do material nas superfícies amostradas, determinando a carga por  $m^2$  para obtenção do coeficiente de build-up, bem como para a análise da influência do período antecedente de seca antes das campanhas amostrais.

### **3.2.2 Determinação do wash-off**

#### **3.2.2.1 Chuva simulada**



Foram utilizadas três intensidades ao longo do tempo experimental. Para determinar as intensidades das chuvas a serem simuladas, fez-se uso das equações de chuva do município de Goiânia do método i-d-f, desenvolvidas por Costa *et al.*, (2007), definidas nas **Equações 3.1 e 3.2**.

$$i = \frac{56,7928}{(t + 24,8)^{0,974711}} \left[ T^{0,1471 + \frac{0,22}{T^{0,09}}} \right]^{0,6274} \quad \text{Válida para: } 1 \text{ ano} \leq T \leq 8 \text{ anos} \quad (3.1)$$

$$i = \frac{64,3044 \times T^{0,1471}}{(t + 24,8)^{0,974711}} \quad \text{Válida para: } 8 \text{ anos} < T \leq 100 \text{ anos} \quad (3.2)$$

Onde:

$i$  = intensidade máxima de chuva (mm/h);

$t$  = duração da chuva (h);

$T$  = período de retorno (anos).

Adotou-se três chuvas para reproduzir os eventos de chuva simulados com intensidades de 69mm/h, 109mm/h e 180mm/h, a fim de reproduzir eventos de chuva com variadas intensidades. Fixou-se a duração dos eventos em 15 minutos. Egodawatta *et al.*, (2007) reproduziu chuvas de 65mm/h, 115mm/h e 133mm/h, com a mesma duração, num estudo semelhante.

O período de retorno utilizado em projetos de estruturas de microdrenagem é de até 5 anos e para projetos de macrodrenagem, como grandes bueiros e pontes, utilizam-se períodos de

retorno entre 10 e 100 anos (COSTA *et al.*, 2007). Para o cálculo da intensidade das chuvas a serem simuladas, adotou-se períodos de retorno de 5, 10 e 40 anos.

#### 3.2.2.2 Simulador de chuva

O simulador de chuva foi utilizado para programar e simular eventos pré-definidos de chuva sobre as parcelas experimentais com intensidades de 69mm/h, 109mm/h e 180mm/h. O simulador de chuva utilizado foi desenvolvido e construído para estudos de eventos artificiais de chuva sobre superfícies em áreas urbanas, por Sousa Junior (2011), conforme ilustrado na **Figura 3.3**.



**Figura 3.3** – Simulador de chuva.

O simulador de chuva é equipado com um registro tipo agulha de  $\frac{1}{2}$  polegada e um manômetro analógico conectados na tubulação d'água para controlar a vazão de entrada e aferir a pressão da água na tubulação do equipamento. Para controlar a intensidade de chuva simulada sem alterar a pressão de serviço e, conseqüentemente, o diâmetro médio das gotas, foram utilizadas duas válvulas solenóides acopladas imediatamente antes dos bicos aspersores, que permitem abertura e fechamento em intervalos programados (**Figura 3.4**).

A operação das válvulas é controlada por um microcomputador baseado em uma plataforma de *software* livre e projetada com um microcontrolador de placa única com suporte de entrada/saída embutido e uma linguagem de programação padrão. As válvulas solenóides são abertas quando energizadas por uma corrente elétrica de 220 volts, produzindo chuva sobre uma área de  $3,0\text{m}^2$  ( $2,0 \times 1,5\text{m}$ ).

O simulador é capaz de reproduzir chuva semelhante a eventos naturais em termos de uniformidade de distribuição da chuva, diâmetros de gotas e energia cinética (SOUSA JÚNIOR, 2011).



**Figura 3.4** – Detalhe dos aspersores de água em funcionamento.

### 3.2.2.3 Calibração do simulador de chuva

A calibração do simulador de chuva foi realizada utilizando-se um coletor de água do mesmo tamanho das parcelas experimentais para a pressão manométrica de 80 quilopascal (kPa) com aberturas constante e intermitente das válvulas dos aspersores. Os resultados da calibração são apresentados na **Tabela 3.1**.

O tempo de abertura indica a duração da passagem de água através dos bicos aspersores e o tempo de fechamento indica a duração da interrupção da passagem de água, que gera intermitência ao evento de chuva artificial.

**Tabela 3.1** – Intensidades médias para as três condições de calibração do simulador de chuvas artificiais.

| <b>Pressão<br/>(kPa)</b> | <b>Intervalos<br/>válvula solenóide</b> | <b>Intensidades<br/>(mm/h)</b> | <b>Intensidade<br/>média<br/>(mm/h)</b> | <b>Desvio<br/>padrão</b> | <b>Variância</b> | <b>Coefficiente<br/>de variação<br/>(%)</b> |
|--------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------|------------------|---------------------------------------------|
| 80                       | Ta = constante<br>Tf = 0                | 177,24                         | <b>179,92</b>                           | 2,45                     | 5,98             | 1,39                                        |
|                          |                                         | 180,50                         |                                         |                          |                  |                                             |
|                          |                                         | 182,03                         |                                         |                          |                  |                                             |
| 80                       | Ta = 3,1 segundo<br>Tf = 2,015 s        | 107,26                         | <b>109,32</b>                           | 1,74                     | 3,06             | 2,52                                        |
|                          |                                         | 109,22                         |                                         |                          |                  |                                             |
|                          |                                         | 111,48                         |                                         |                          |                  |                                             |
| 80                       | Ta = 1,17 segundo<br>Tf = 3 segundos    | 67,77                          | <b>69,28</b>                            | 1,74                     | 3,06             | 2,52                                        |
|                          |                                         | 68,89                          |                                         |                          |                  |                                             |
|                          |                                         | 71,20                          |                                         |                          |                  |                                             |

Ta = tempo de abertura das válvulas; Tf = tempo de fechamento das válvulas.

Nas 3 medições houve pequenos valores do coeficiente de variação (1,39 e 2,52%), o que sugere uma pequena variação em torno do valor esperado. As intensidades médias encontradas foram arredondadas para 69mm/h, 109mm/h e 180mm/h, sendo estas as condições de trabalho utilizadas.

#### 3.2.2.4 Coleta de wash-off

A documentação das técnicas que descrevem a coleta de amostras de wash-off em superfícies pavimentadas é escassa. Geralmente, quando áreas relativamente grandes e heterogêneas são investigadas, as amostras são coletadas através de amostradores automáticos, ou manualmente usando recipientes quando a água escoada entra nos canais de drenagem (SMITH *et al.*, 2001).

No contexto desta pesquisa, amostras das águas do escoamento foram coletadas de áreas pequenas e homogêneas para reduzir o número de variáveis físicas envolvidas, dentre outros fatores. Assim, um quadro de 2,0x1,5m e 50mm de altura com uma borracha na parte inferior e uma espuma expansiva nas laterais, conforme demonstrado na **Figura 3.5**, foi fixado à superfície pavimentada para evitar o escoamento fora da área limitada, além de evitar a mistura da amostragem dentro da área limitada com a área externa. O tamanho da parcela ( $3,0\text{m}^2$ ) foi definido a fim de compatibilizá-la com o tamanho do simulador de chuva, o qual foi construído para operar sobre uma área superficial desse tamanho.



**Figura 3.5** – Quadro usado na delimitação das parcelas experimentais

Um tubo de 100mm foi acoplado ao quadro onde a água escoada foi amostrada. Na saída do tubo foi escavado um buraco de 40cm na superfície, tamanho suficiente para introduzir os frascos de coleta das amostras, e ainda, permitindo realizar as medidas de vazão por meio do método volumétrico. A **Figura 3.6** ilustra o equipamento instalado para coleta.



**Figura 3.6** – Equipamento instalado para coleta.

Vaze e Chiew (1997) utilizaram uma técnica similar na coleta de escoamento de uma superfície pavimentada. Eles usaram um quadro de madeira isolando a área de estudo com um buraco escavado na saída para colocar garrafas de amostra para coleta do escoamento.

As coletas foram realizadas em três campanhas de amostragem, nos mesmos períodos das coletas de build-up, sendo a 1ª coleta realizada no dia 11/06/12, a 2ª no dia 19/06/12 e a 3ª no dia 04/07/12.

Foram coletadas cinco amostras durante a duração da chuva, logo foram coletadas amostras a cada 3 min. As amostras foram coletadas em recipientes específicos, na saída do tubo fixado no quadro, onde a água escoada era coletada diretamente nesses recipientes, correspondentes aos parâmetros que foram analisados.

De acordo com Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 1999), garrafas de amostras devem ser escolhidas cuidadosamente, dependendo da análise a ser realizada. Logo, essas orientações foram seguidas e garrafas de vidro âmbar e de polietileno foram utilizadas para o armazenamento das amostras, de acordo com cada parâmetro a ser analisado.

As amostras de wash-off coletadas ao longo dos eventos simulados foram devidamente identificadas e encaminhadas ao laboratório para análises. Não houve necessidade de refrigeração para conservar as amostras até a entrada no laboratório para as análises, conforme procedimentos laboratoriais, pois o mesmo encontrava-se próximo ao local de coleta, logo as amostras eram coletadas e encaminhadas rapidamente ao laboratório.

### 3.2.2.5 Parâmetros de controle

A fim de quantificar o wash-off, foram monitorados, no escoamento, os seguintes metais: cromo, cádmio, cobre, chumbo, níquel, zinco, manganês e ferro. Outros parâmetros de qualidade, como turbidez, pH, alcalinidade, sólidos suspensos, PAHs, coliformes totais e termotolerantes também foram analisados. Esses parâmetros foram escolhidos com base em variáveis importantes que regem a distribuição de poluentes em águas pluviais urbanas.

Os parâmetros de qualidade da água que foram analisados, as metodologias e os equipamentos utilizados são mostrados, resumidamente, na **Tabela 3.2**. A **Figura 3.7** ilustra o ICP utilizado para as análises dos metais.

**Tabela 3.2** – Parâmetros de qualidade da água, métodos e equipamentos utilizados.

| PARÂMETRO                  | MÉTODO/EQUIPAMENTO                           |
|----------------------------|----------------------------------------------|
| Metais                     | ASTM <sup>1</sup> D5185/ICP-AES <sup>2</sup> |
| Turbidez                   | SMWW <sup>3</sup> 2130/ Turbidímetro         |
| pH                         | SMWW 4500 H <sup>+</sup> /<br>Potenciômetro  |
| Alcalinidade               | SMWW 2320                                    |
| Coliformes totais          | SMWW 9221 B                                  |
| Coliformes termotolerantes | SMWW 9221 E                                  |
| Sólidos suspensos          | SMWW Espectrofotômetro                       |

(1) American Society for Testing and Materials

(2) Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry

(3) Standard Methods of Water & Wastewater



**Figura 3.7** – ICP para análise dos metais

Juntamente com os parâmetros de qualidade de água que foram analisados, foi feito controle da vazão nos eventos simulados. As medidas foram feitas nos mesmos intervalos de tempo utilizado para a coleta das amostras (cada 3 min ao decorrer do evento). Para a medida da vazão utilizou-se o método volumétrico de medida de vazão.

Os exames e análises foram realizados no Laboratório Aqualit. Foram utilizadas as metodologias descritas no Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA *et al.*, 2005), garantindo precisão durante o regime de análises.

É importante salientar que o período experimental teve uma fase de ajuste dos componentes operacionais. A intenção foi realizar um monitoramento preciso durante o período de amostragem, no entanto, muitas dificuldades são enfrentadas quando se trata de trabalhos de campo. Problemas como falhas nos equipamentos, materiais disponíveis nos laboratórios, detecção e controle de vazamentos, além da dependência da ocorrência natural seca/chuva, que interrompia as coletas e influenciava nos períodos.



### 3.2.3 Equações

Para o cálculo das cargas por metro quadrado, dos fluxos de poluentes, das vazões e das massas deslocadas, conforme objetivos propostos nesta pesquisa, foram utilizadas as **Equações 3.3 a 3.6** apresentadas.

$$Ca = Q \times C \quad (3.3)$$

Onde:

Ca – carga (mg/s);

Q – vazão (L/s);

C – concentração (mg/L).

$$Ma = Ca \times t \quad (3.4)$$

Onde:

Ma – massa acumulada (mg);

Ca – carga (mg/s);

t – tempo (s).

$$Q = \frac{V}{t} \quad (3.5)$$

Onde:

Q – vazão (L/s);

V – volume (L);

T – tempo (s).

$$CA = \frac{Mt}{A} \quad (3.6)$$

Onde:

CA – carga (mg/m<sup>2</sup>);

Mt = massa total (mg);

A – área (m<sup>2</sup>).

### 3.2.4 Cálculo da CME e construção de polutogramas

Para uma avaliação geral das concentrações foi calculada a Concentração Média do Evento (CME) utilizando a **Equação 3.7**, apresentada por Lee *et al.*, (2002). O uso desta é apropriado para avaliar os efeitos do escoamento superficial nos corpos d'água receptores, sendo um importante parâmetro a ser analisado.

$$CME = \frac{M}{V} = \frac{\int_0^{tr} C_t Q_t dt}{\int_0^{tr} Q_t dt} \cong \frac{\sum C_t Q_t \Delta t}{\sum Q_t \Delta t} \quad (3.7)$$

Onde:

CME – concentração média do evento (mg/L);

M – massa total de poluente durante o evento (g);

V – volume total durante o evento (m<sup>3</sup>);

t – tempo (s);

Ct – concentração no tempo t (mg/L);

Qt – vazão no tempo t (m<sup>3</sup>/s);

Δt – intervalo de tempo (s).

Após o cálculo das CMEs, fez-se uma comparação dos resultados com os períodos antecedentes de seca aos eventos simulados.

A variação da concentração dos poluentes transportada e da vazão durante os eventos simulados foi descrita por duas curvas: hidrograma  $Q(t)$  e polutograma  $C(t)$  para cada poluente analisado, onde  $Q$  representa a vazão ( $L/s$ ); e  $C$  a concentração ( $mg.L^{-1}$ ).

### 3.2.5 Análise estatística

Com o objetivo de retratar a quantificação do acúmulo, foram ajustadas as equações de build-up (**Equação 2.1, 2.2, 2.3 e 2.4** – pg. 48), com uso de software estatístico.

Para a representação dos valores obtidos na análise da qualidade da água, foram construídos gráficos Box and Whisker plots da distribuição dos valores de cada parâmetro analisado.

Posteriormente, as características de qualidade da água foram analisadas estatisticamente por análises de correlação em que a relação entre os parâmetros foi representada pelo coeficiente de correlação de Pearson, que varia de +1 (correlação perfeita positiva) a -1 (correlação perfeita negativa). Análises similares foram feitas por Kim *et al.*, (2006) e Gastaldini *et al.*, (2008).

E, ainda, foi feito uma regressão não linear de dados para ajuste da **Equação 2.5** (pg. 54), a qual determina o coeficiente de wash-off, por meio do método dos mínimos quadrados com o uso de software estatístico.

## CAPÍTULO 4 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos na pesquisa, sendo eles: quantificação do acúmulo, análise dos parâmetros de qualidade da água correlacionando-os e, posteriormente, calculando a CME de cada parâmetro analisado e comparando-a com o período antecedente seco, a construção de polutogramas e a estimativa do processo de wash-off relacionando com as intensidades simuladas.

### 4.2 CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS

#### 4.2.1 Build-up

O peso das partículas em cada área foi registrado na **Tabela 4.1**, juntamente com o número de dias secos antecedentes antes das amostragens.

**Tabela 4.1** – Amostra do build-up coletada em cada parcela e respectivo período seco

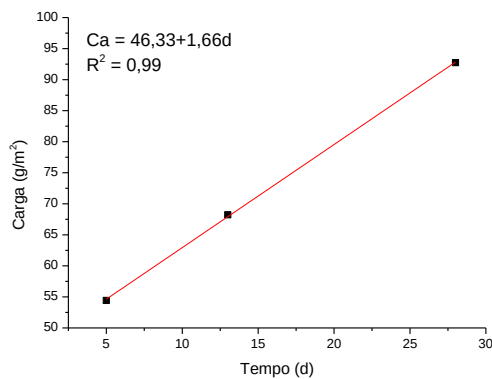
| <b>Parcela amostrada</b> | <b>Peso das partículas (g)</b> | <b>Dias secos</b> |
|--------------------------|--------------------------------|-------------------|
| P <sub>1a</sub>          | 163,3                          | 5                 |
| P <sub>2a</sub>          | 204,7                          | 8                 |
| P <sub>3a</sub>          | 278,2                          | 15                |

A maior quantidade de partículas foi coletada na parcela P<sub>3a</sub>, que por sua vez teve a maior quantidade de dias secos antes da coleta. Isto indica uma correlação entre a acumulação de

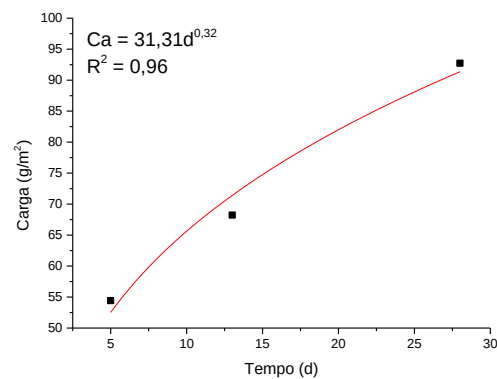
partículas e o período seco após um evento de chuva na área até o próximo evento. Este acontecimento também foi relatado por Herngren (2005).

Além disso, é importante salientar que um grande número de partículas pode ser atribuído aos veículos e desgaste da superfície devido à quantidade de aceleração e desaceleração de veículos no local. E ainda, uma elevada quantidade de detritos de folhas foi observada no momento da amostragem na área analisada.

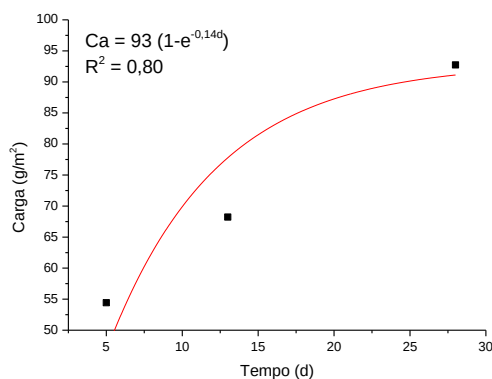
As coletas do build-up foram realizadas conforme descrito na metodologia e ocorreram durante os três períodos de amostragem. As **Figuras 4.1 a 4.4** apresentam os gráficos da variação das cargas ao longo dos períodos amostrais, plotado após a quantificação das amostras em laboratório, nas quatro equações possíveis de uso nos modelos de qualidade da água, como SWMM.



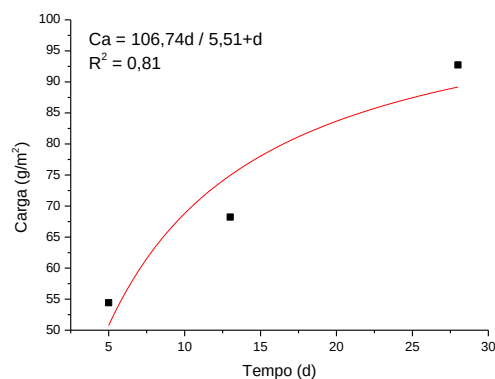
**Figura 4.1** – Gráfico do Build-up Linear



**Figura 4.2** – Gráfico do Build-up Potencial



**Figura 4.3** – Gráfico do Build-up Exponencial



**Figura 4.4** – Gráfico do Build-up Michaelis-Menton

Através dos gráficos apresentados constata-se que o melhor ajuste é linear. Quanto mais dias secos antecedentes há uma maior acúmulo de poluentes, e a carga desses poluentes se acumula linearmente ao decorrer do tempo.

#### 4.2.2 Análise dos parâmetros de qualidade da água

Foram realizadas análises com amostras da água proveniente do escoamento da superfície avaliada em cada período. A **Tabela 4.2** apresenta um resumo dos resultados obtidos nas análises, em todas as parcelas amostrais.

**Tabela 4.2** – Resumo dos resultados das análises de qualidade da água

| PARÂMETROS                                   | VALORES |        |
|----------------------------------------------|---------|--------|
|                                              | Mínimo  | Máximo |
| <b>Turbidez (UNT)</b>                        | 8,28    | 464,00 |
| <b>pH</b>                                    | 6,64    | 7,40   |
| <b>Alcalinidade (mg.L<sup>-1</sup>)</b>      | 30,00   | 53,00  |
| <b>Sólidos suspensos (mg.L<sup>-1</sup>)</b> | 2,00    | 496,00 |
| <b>PAH</b>                                   | < ND    | < ND   |
| <b>Cromo (mg.L<sup>-1</sup>)</b>             | 0,005   | 0,232  |
| <b>Cádmio (mg.L<sup>-1</sup>)</b>            | < 0,001 | 0,007  |

Cont. **Tabela 4.2** – Resumo dos resultados das análises de qualidade da água

| PARÂMETROS                                    | VALORES |        |
|-----------------------------------------------|---------|--------|
|                                               | Mínimo  | Máximo |
| <b>Cobre</b> (mg.L <sup>-1</sup> )            | < 0,002 | 0,098  |
| <b>Chumbo</b> (mg.L <sup>-1</sup> )           | < 0,01  | 0,510  |
| <b>Níquel</b> (mg.L <sup>-1</sup> )           | < 0,007 | 0,049  |
| <b>Zinco</b> (mg.L <sup>-1</sup> )            | < 0,02  | 0,92   |
| <b>Manganês</b> (mg.L <sup>-1</sup> )         | 0,023   | 0,554  |
| <b>Ferro total</b> (mg.L <sup>-1</sup> )      | 0,632   | 38,47  |
| <b>Coliformes totais</b> (NMP/100mL)          | A       | 2100   |
| <b>Coliformes termotolerantes</b> (NMP/100mL) | A       | 2100   |

Legenda: ND = Nível de detecção; A = ausente.

Existem 45 números de amostras para cada parâmetro.

Ampla faixa de variação de concentração máxima e mínima foi encontrada. A alcalinidade e o pH foram os parâmetros que apresentaram pouca variação. Os valores de alcalinidade mantiveram-se numa faixa de 30,00 a 53,00 mg.L<sup>-1</sup>, e valores de pH entre 6,64 a 7,40, com variações muito pequenas. Gastaldini (2008) obteve uma faixa de 6,0 a 9,0 de pH, valor muito próximo do obtido no presente trabalho.

Alguns parâmetros, como turbidez, sólidos suspensos, chumbo e manganês, apresentaram concentrações elevadas. Oliveira (2007) também encontrou valor elevado de turbidez, chegando a 394 UNT, num estudo semelhante. Nota-se, portanto, o impacto das ações antrópicas em uma área de drenagem urbana.

#### 4.2.2.1 Concentração Média dos Eventos – CME's

Foi calculada a Concentração Média do Evento (CME) de cada período experimental, conforme **Equação 2.10** – pg. 57. A **Tabela 4.3** apresenta os valores obtidos para as CMEs dos parâmetros analisados para cada evento simulado nos diferentes períodos. As CME's representam melhor os eventos de drenagem pluvial (IDE, 2011).

**Tabela 4.3** – CME para cada evento nas três campanhas amostrais

| Parâmetro                | Concentração Média do Evento (CME) |         |         |            |         |         |            |         |         |
|--------------------------|------------------------------------|---------|---------|------------|---------|---------|------------|---------|---------|
|                          | 11/06/2012                         |         |         | 19/06/2012 |         |         | 04/07/2012 |         |         |
|                          | 69mm/h                             | 109mm/h | 180mm/h | 69mm/h     | 109mm/h | 180mm/h | 69mm/h     | 109mm/h | 180mm/h |
| SS (mg.L <sup>-1</sup> ) | 47,80                              | 70,20   | 109,20  | 53,00      | 74,60   | 113,40  | 57,40      | 80,00   | 124,60  |
| Cr (mg.L <sup>-1</sup> ) | 0,0200                             | 0,0280  | 0,0496  | 0,0230     | 0,0310  | 0,0534  | 0,0254     | 0,0330  | 0,0590  |
| Cd (mg.L <sup>-1</sup> ) | 0,0018                             | 0,0012  | 0,0012  | 0,0020     | 0,0024  | 0,0022  | 0,0028     | 0,0012  | 0,0032  |
| Cu (mg.L <sup>-1</sup> ) | 0,0094                             | 0,0132  | 0,0208  | 0,0114     | 0,0162  | 0,0220  | 0,0122     | 0,0164  | 0,0242  |
| Pb (mg.L <sup>-1</sup> ) | 0,0308                             | 0,0510  | 0,1020  | 0,0332     | 0,0616  | 0,1240  | 0,0378     | 0,0642  | 0,1240  |
| Ni (mg.L <sup>-1</sup> ) | 0,0080                             | 0,0098  | 0,0126  | 0,0092     | 0,0114  | 0,0142  | 0,0106     | 0,0128  | 0,0156  |
| Zn (mg.L <sup>-1</sup> ) | 0,0640                             | 0,1118  | 0,1874  | 0,0760     | 0,1262  | 0,2028  | 0,0840     | 0,1280  | 0,2240  |
| Mn (mg.L <sup>-1</sup> ) | 0,0640                             | 0,0860  | 0,1524  | 0,0712     | 0,0930  | 0,1578  | 0,0746     | 0,0938  | 0,1632  |
| Fe (mg.L <sup>-1</sup> ) | 3,2240                             | 6,1094  | 9,4026  | 3,3554     | 6,8448  | 9,9316  | 3,5738     | 7,1054  | 10,153  |

Os parâmetros sólidos suspensos, zinco, manganês e ferro apresentaram CME's elevadas e variáveis entre os eventos. Silva *et al.*, (2011) obtiveram valor superior da CME de sólidos suspensos chegando a 229,8 mg.L<sup>-1</sup>. Os parâmetros cádmio, cobre e níquel apresentaram pequena variação entre os eventos para as CMEs, o que também foi relatado por Gastaldini *et al.*, (2008).

As concentrações de chumbo, níquel, zinco e manganês apresentaram níveis elevados nos três eventos simulados, levando a dados preocupantes visto que os metais podem causar doenças significantes e impactos ambientais mesmo em baixas concentrações.

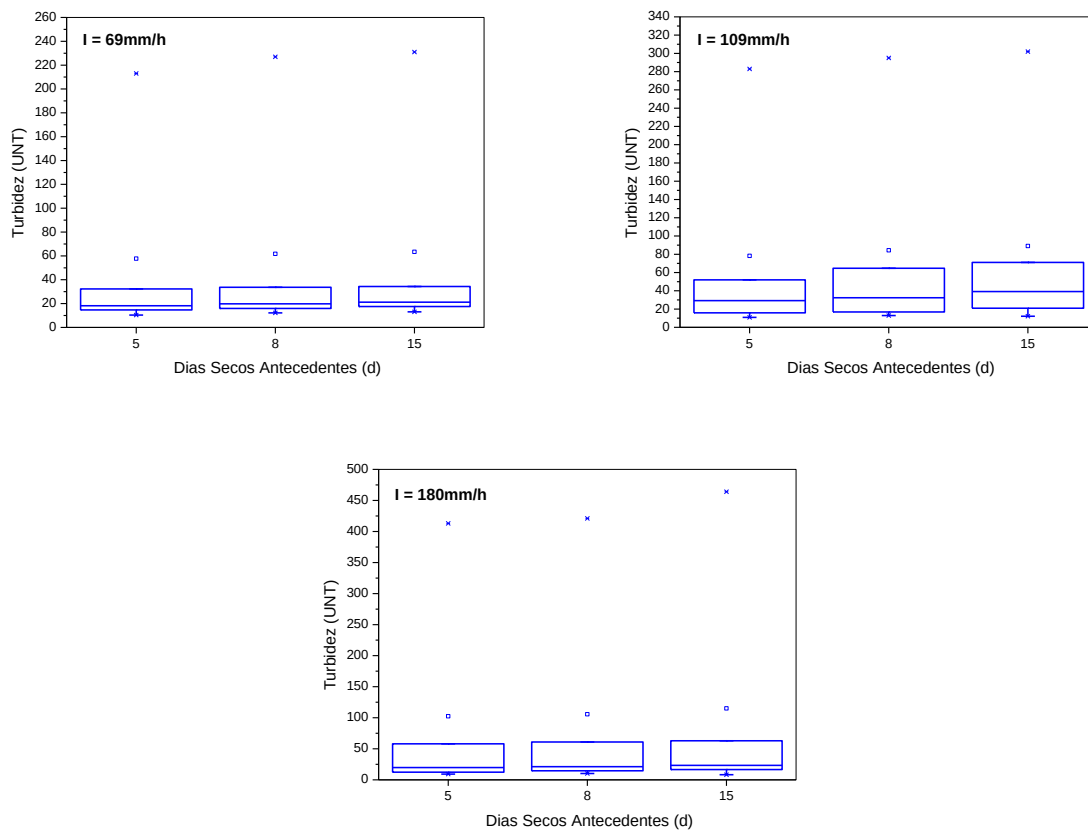
Esses valores elevados podem estar associados à área de estudo devido ao grande tráfego de veículos no local, os quais constituem-se poluentes que podem ter sido incorporados à superfície durante suas movimentações, indicando a interferência da área escolhida na pesquisa.

O parâmetro PAH não foi detectado em nenhuma amostra analisada em todos os eventos simulados.

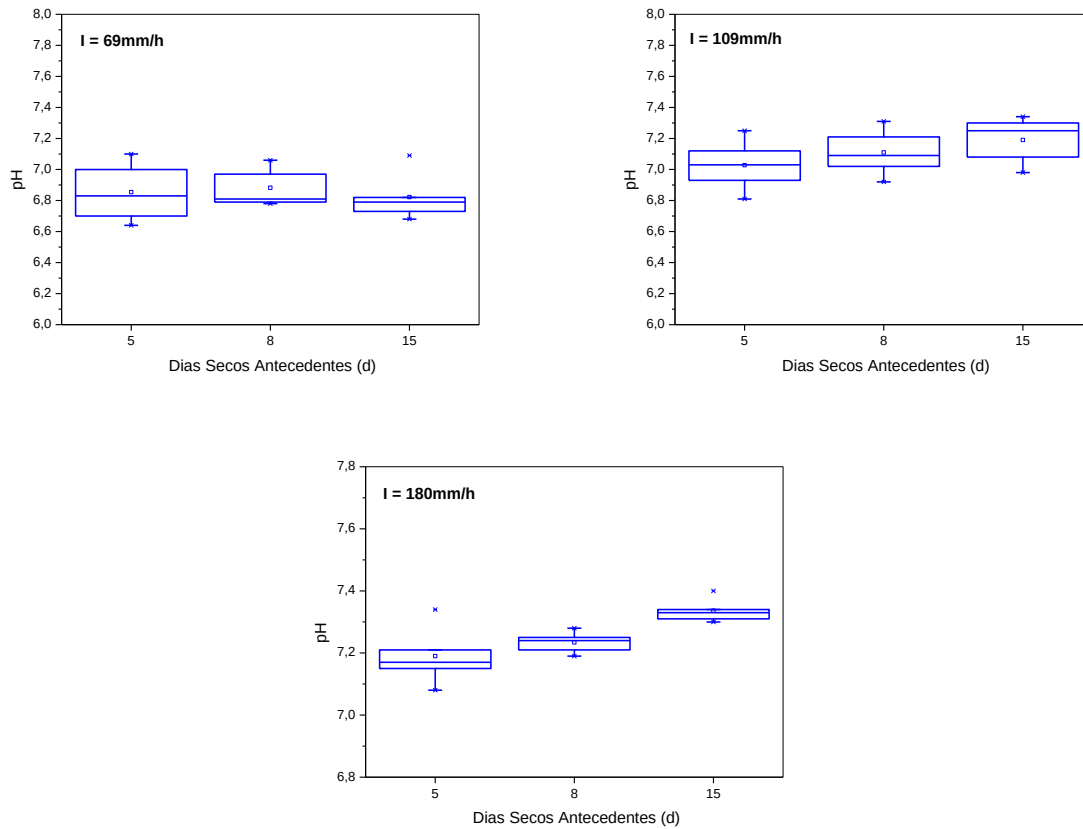
#### 4.2.2.2 Box Whisker dos parâmetros de qualidade.



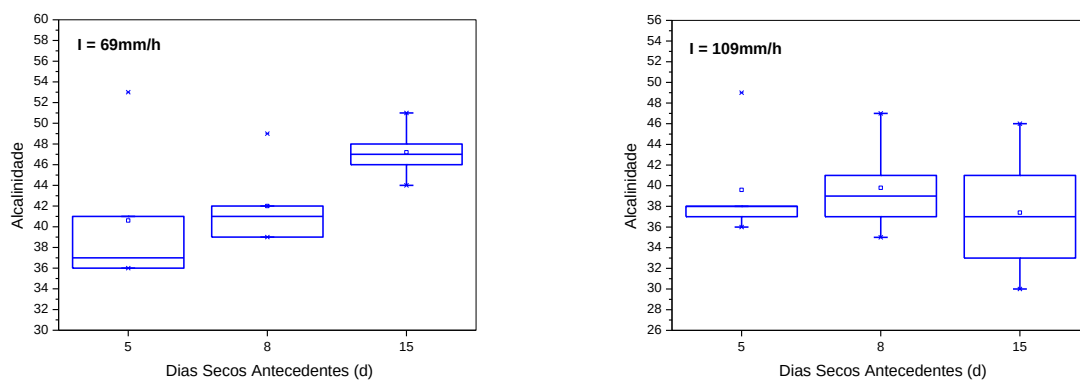
Os gráficos a seguir apresentam os resultados dos cálculos estatísticos (mediana, quartis e limite superior e inferior) da distribuição dos valores dos parâmetros pH, turbidez, alcalinidade, sólidos suspensos, coliformes totais, coliformes termotolerantes, PAH's e metais (cromo, cádmio, cobre, chumbo, níquel, zinco, manganês e ferro) obtidos em cada parcela amostral.

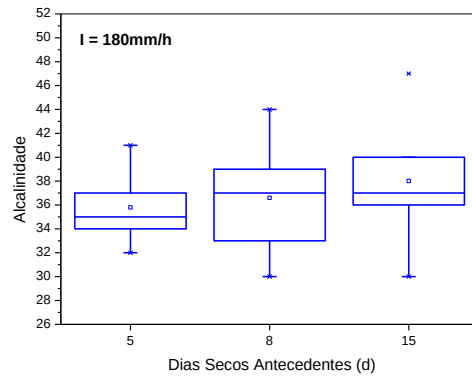


**Figura 4.5** – Box-Whisker de turbidez com diferentes DSA para cada intensidade.

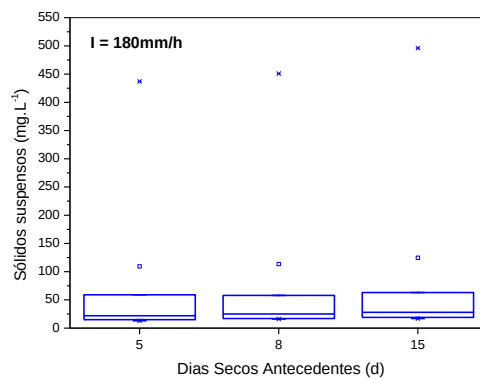
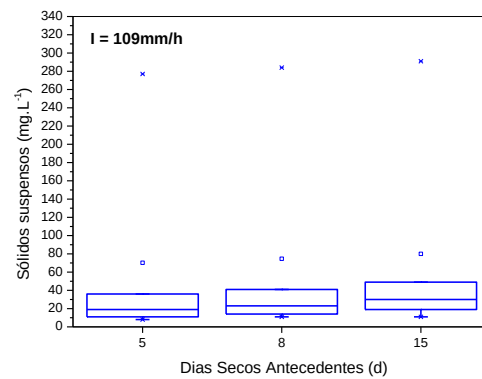
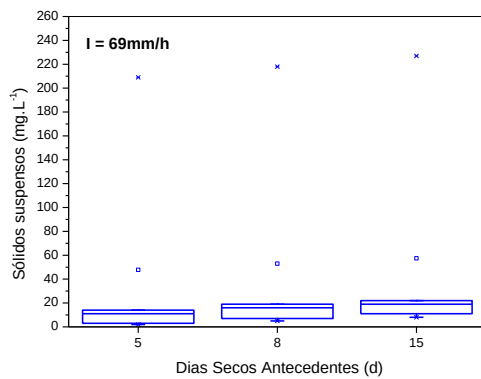


**Figura 4.6** – Box-Whisker de pH com diferentes DSA para cada intensidade.

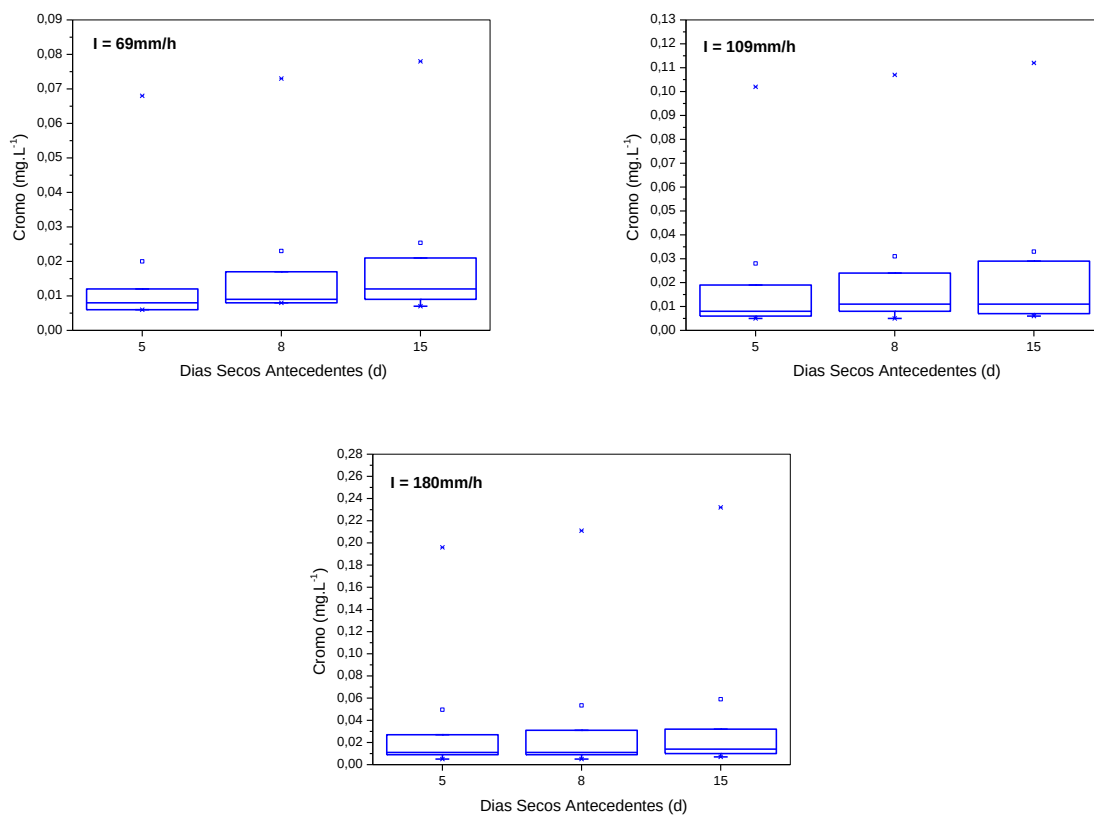




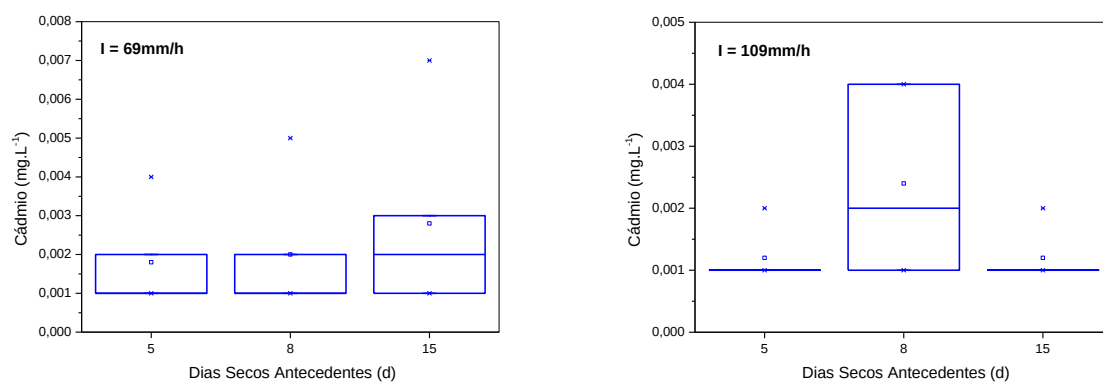
**Figura 4.7** – Box-Whisker de alcalinidade com diferentes DSA para cada intensidade.

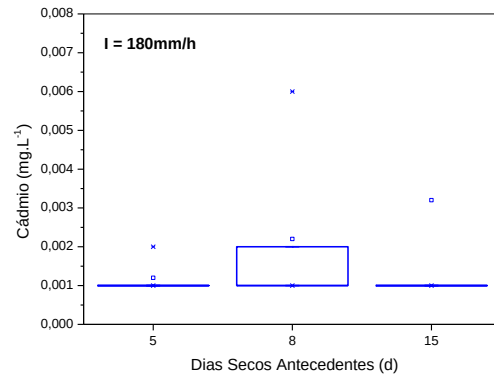


**Figura 4.8** – Box-Whisker de sólidos suspensos com diferentes DSA para cada intensidade.

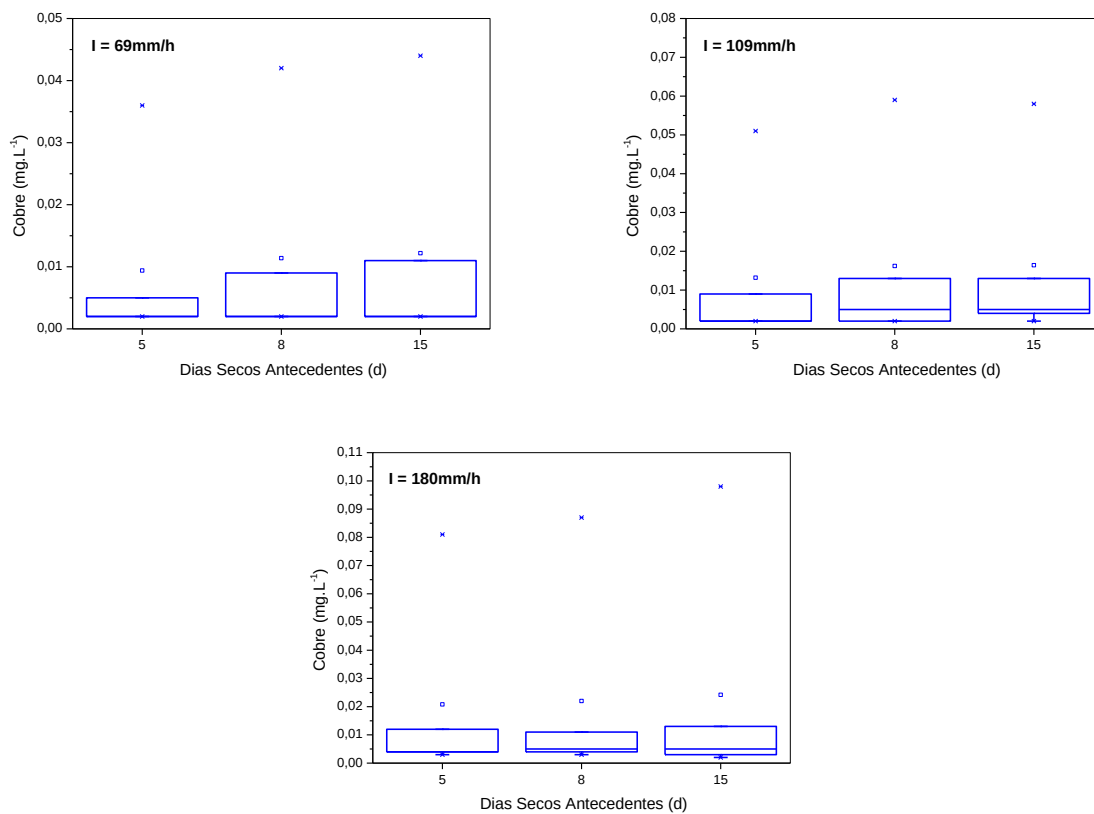


**Figura 4.9** – Box-Whisker de cromo com diferentes DSA para cada intensidade.

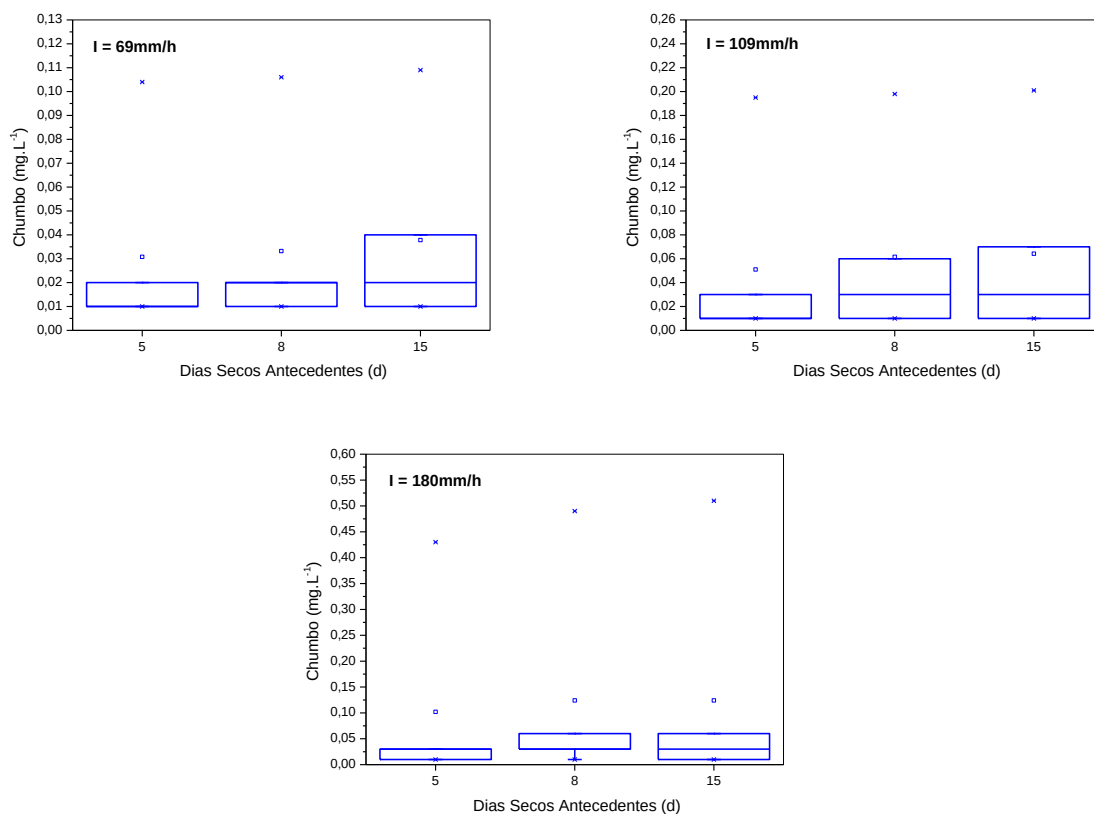




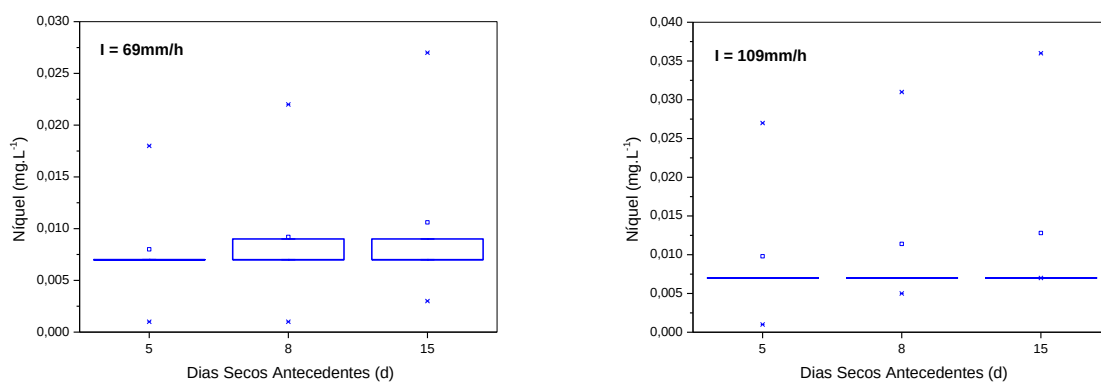
**Figura 4.10** – Box-Whisker de cádmio com diferentes DSA para cada intensidade.

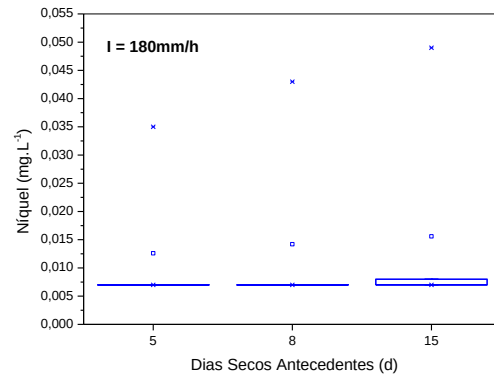


**Figura 4.11** – Box-Whisker de cobre com diferentes DSA para cada intensidade.

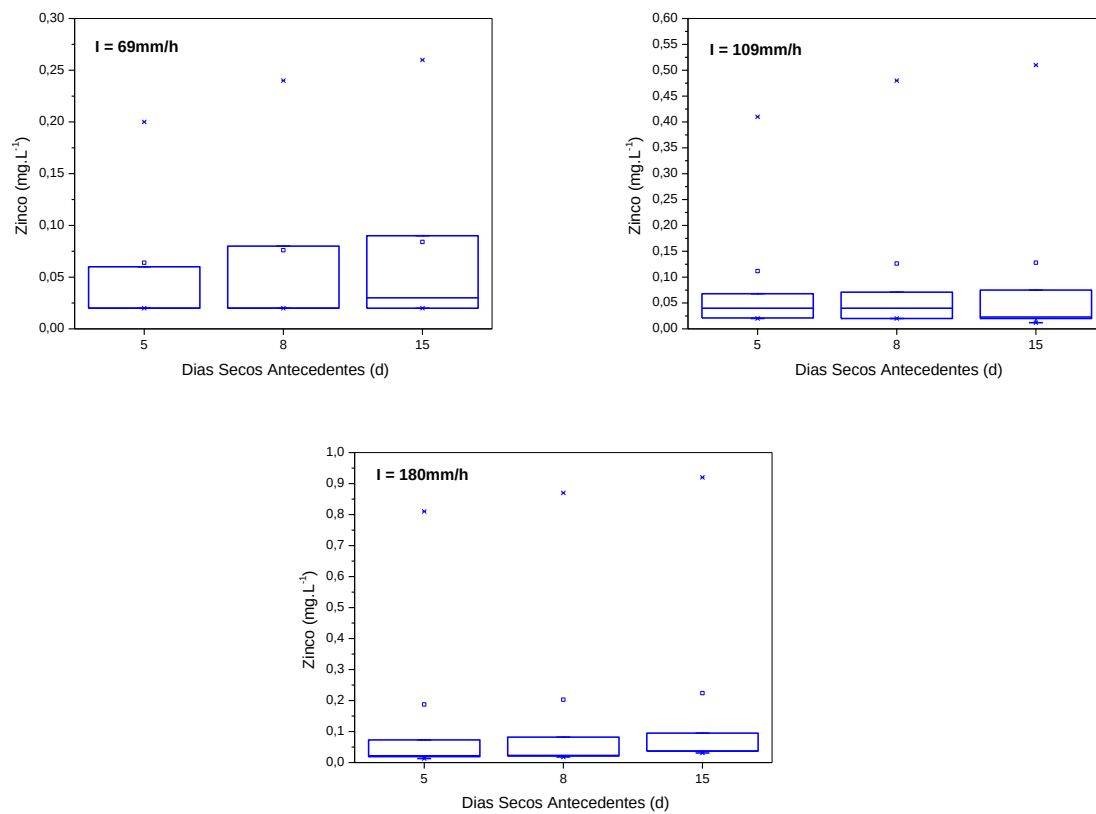


**Figura 4.12** – Box-Whisker de chumbo com diferentes DSA para cada intensidade.

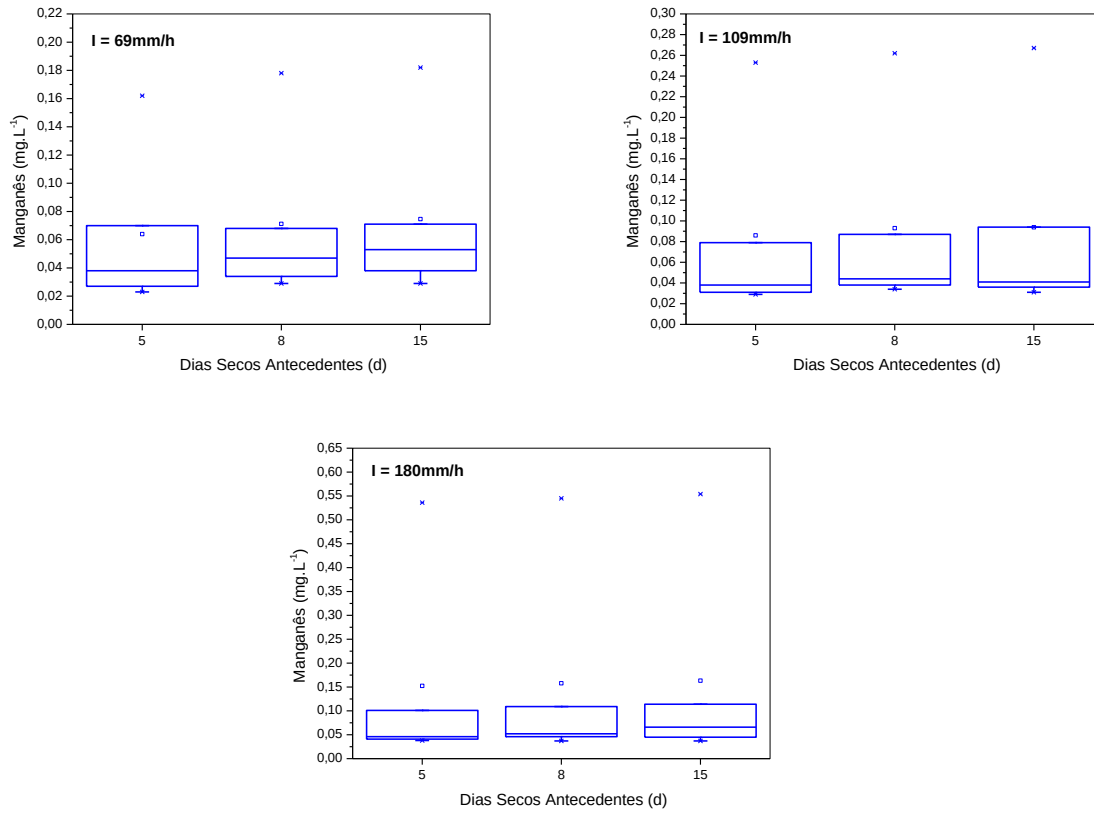




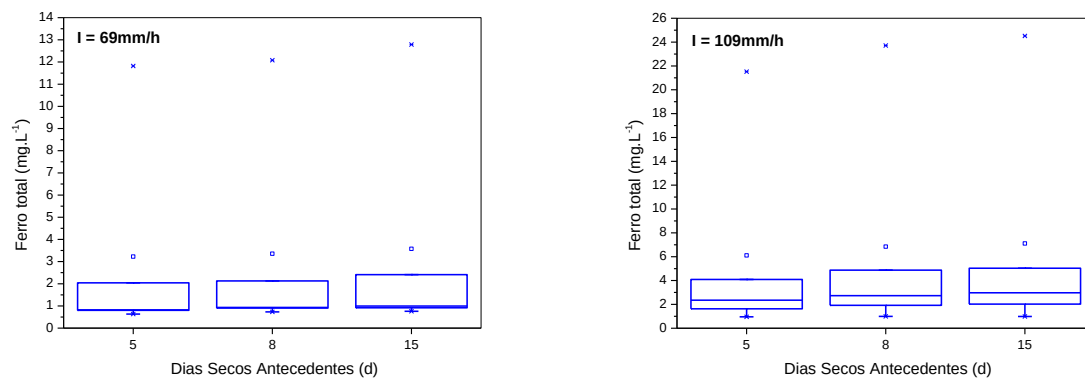
**Figura 4.13** – Box-Whisker de níquel com diferentes DSA para cada intensidade.



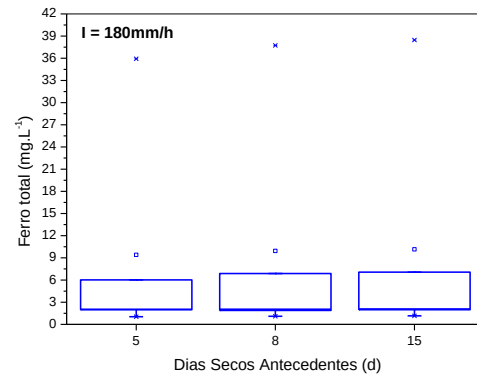
**Figura 4.14** – Box-Whisker de zinco com diferentes DSA para cada intensidade.



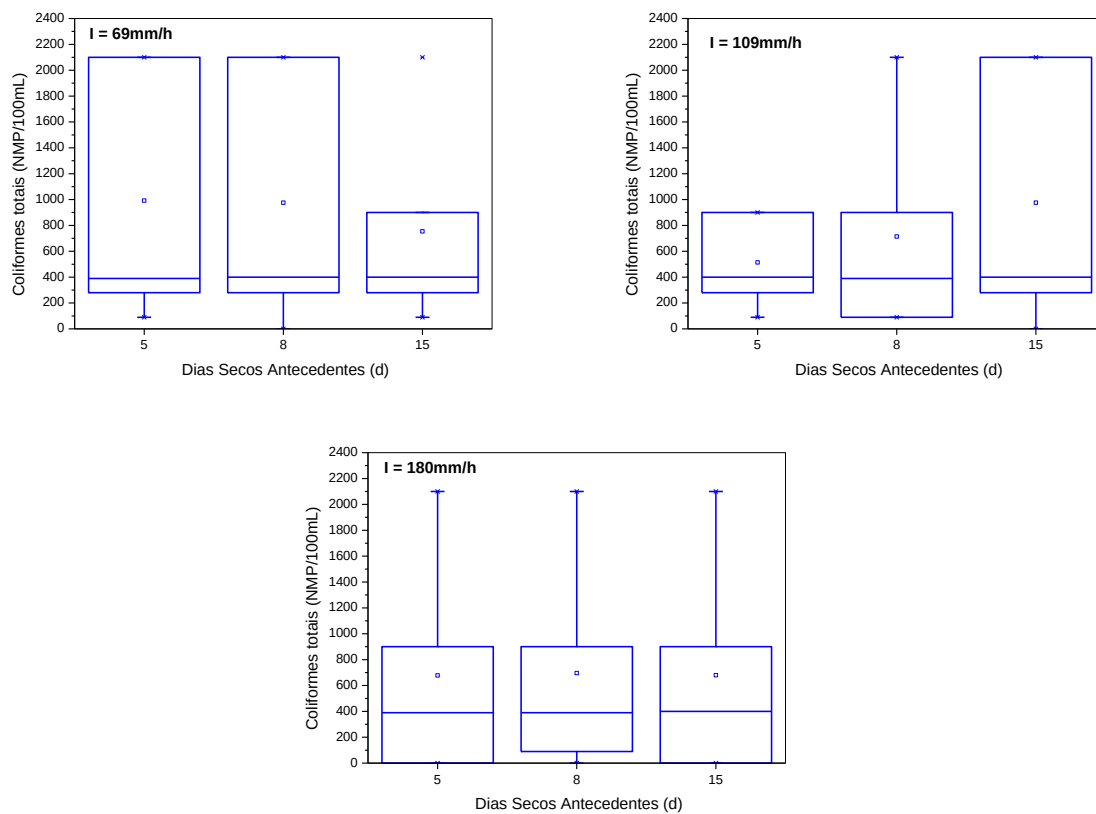
**Figura 4.15** – Box-Whisker de manganês com diferentes DSA para cada intensidade.



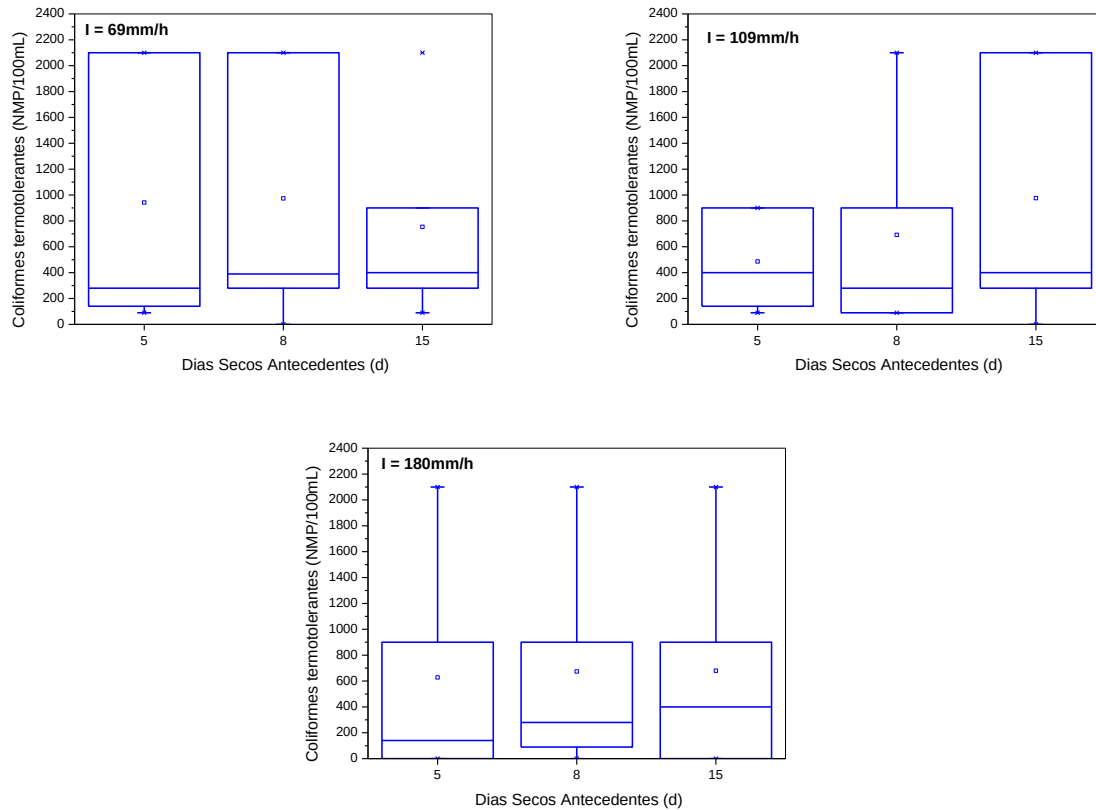




**Figura 4.16** – Box-Whisker de ferro total com diferentes DSA para cada intensidade.



**Figura 4.17** – Box-Whisker de coliformes totais com diferentes DSA para cada intensidade.



**Figura 4.18** – Box-Whisker de coliformes termotolerantes com diferentes DSA para cada intensidade.

Os dias secos antecedentes (DSA) é o número de dias antecedentes de estiagem antes da simulação de chuva, frequentemente utilizado em estudos de qualidade de drenagem pluvial urbana. Pesquisadores têm utilizado esse fator relacionando-o com o acúmulo de poluentes e seu escoamento durante um evento de drenagem pluvial.

Avaliou-se a relação entre o DSA e as concentrações obtidas do escoamento dos eventos simulados. De acordo com os gráficos apresentados, verificou-se que, de um modo geral, os valores dos parâmetros analisados encontraram-se mais elevados nas amostras obtidas após 15 dias secos antecedentes antes do evento simulado. Isto significa que o aumento das concentrações se dá devido ao tempo de acúmulo.

Segundo Ide (1984), os dias secos antecedentes interferem na quantidade de carga poluidora. Logicamente, se os contaminantes são depositados uniformemente ao longo do tempo, haverá um maior depósito a ser carreado no próximo evento chuvoso. Oliveira (2007) relatou que muitas variáveis podem interferir nesse processo, como a intensidade da precipitação, o volume precipitado, a heterogeneidade do uso e ocupação do solo em função da localização das precipitações, o tipo do solo, o deslocamento das partículas, etc.

Chui (1997) realizou estudo semelhante em duas áreas urbanas e observou relação significativa entre os dias secos antecedentes e os eventos de drenagem pluvial monitorados. Deletic e Orr (2005) e Brites e Gastaldini (2005) também encontraram relação entre o período seco antecedente e o carreamento de poluentes.

#### 4.2.3 Correlação entre parâmetros

Correlacionar parâmetros pode mostrar a relação entre os constituintes da água. Obtidas as correlações entre determinados parâmetros, alguns podem ser determinados através das concentrações de outros que tenham sido medidos em laboratórios. Com o objetivo de caracterizar os parâmetros da água de escoamento analisados, foi realizada análise de correlação.

Por meio dos coeficientes de correlação em negrito na **Tabela 4.4**, verifica-se que há uma associação direta e acentuada, entre algumas variáveis, nominalmente: Turbidez (Alc, SS, Cr, Cu, Pb, Ni, Zn, Mn, Fe, Cto, Cte); Alcalinidade (SS, Cr, Cu, Ni, Cto, Cte); Sólidos suspensos (Cr, Cu, Pb, Ni, Zn, Mn, Fe, Cto, Cte); Cromo (Cu, Pb, Ni, Zn, Mn, Fe, Cto, Cte); Cobre (Pb, Ni, Zn, Mn, Fe, Cto, Cte); Chumbo (Ni, Zn, Mn, Fe, Cto, Cte); Níquel (Zn, Mn, Fe, Cto, Cte); Zinco (Mn, Fe, Cto, Cte); Manganês (Fe, Cto, Cte); Ferro (Cto, Cte); e coliforme total com coliforme termotolerante.

**Tabela 4.4** – Coeficiente de correlação Pearson com base nas variáveis analisadas (Turbidez (TURB), pH, Alcalinidade (ALC), Sólidos suspensos (SS), Cromo (Cr), Cádmio (Cd), Cobre (Cu), Chumbo (Pb), Níquel (Ni), Zinco (Zn), Manganês (Mn), Ferro (Fe), Coliformes Totais (Cto) e Coliformes Termotolerantes (Cte).

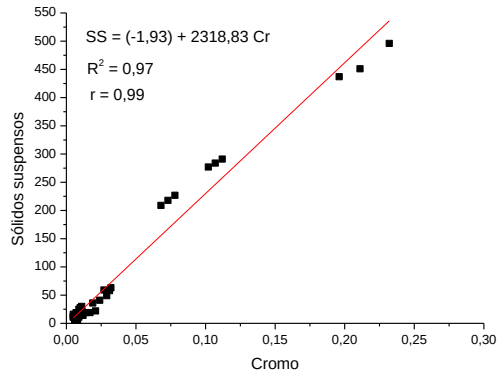
|             | Turb        | pH          | Alc         | SS          | Cr          | Cd          | Cu          | Pb          | Ni          | Zn          | Mn          | Fe          | Cto         | Cte         |
|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| <b>Turb</b> | <b>1,00</b> |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |
| <b>pH</b>   | -0,17       | <b>1,00</b> |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |
| <b>Alc</b>  | <b>0,59</b> | -0,64       | <b>1,00</b> |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |
| <b>SS</b>   | <b>1,00</b> | -0,12       | <b>0,56</b> | <b>1,00</b> |             |             |             |             |             |             |             |             |             |             |
| <b>Cr</b>   | <b>0,98</b> | -0,07       | <b>0,51</b> | <b>0,99</b> | <b>1,00</b> |             |             |             |             |             |             |             |             |             |
| <b>Cd</b>   | 0,16        | -0,16       | 0,22        | 0,17        | 0,11        | <b>1,00</b> |             |             |             |             |             |             |             |             |
| <b>Cu</b>   | <b>1,00</b> | -0,13       | <b>0,57</b> | <b>1,00</b> | <b>0,99</b> | 0,16        | <b>1,00</b> |             |             |             |             |             |             |             |
| <b>Pb</b>   | <b>0,95</b> | 0,01        | 0,43        | <b>0,96</b> | <b>0,99</b> | 0,05        | <b>0,96</b> | <b>1,00</b> |             |             |             |             |             |             |
| <b>Ni</b>   | <b>0,97</b> | -0,08       | <b>0,56</b> | <b>0,97</b> | <b>0,96</b> | 0,17        | <b>0,97</b> | <b>0,93</b> | <b>1,00</b> |             |             |             |             |             |
| <b>Zn</b>   | <b>0,97</b> | -0,06       | 0,49        | <b>0,98</b> | <b>0,99</b> | 0,09        | <b>0,98</b> | <b>0,99</b> | <b>0,96</b> | <b>1,00</b> |             |             |             |             |
| <b>Mn</b>   | <b>0,96</b> | -0,04       | 0,46        | <b>0,97</b> | <b>0,99</b> | 0,10        | <b>0,97</b> | <b>0,99</b> | <b>0,93</b> | <b>0,99</b> | <b>1,00</b> |             |             |             |
| <b>Fe</b>   | <b>0,98</b> | -0,05       | 0,50        | <b>0,99</b> | <b>0,99</b> | 0,10        | <b>0,99</b> | <b>0,98</b> | <b>0,96</b> | <b>0,99</b> | <b>0,99</b> | <b>1,00</b> |             |             |
| <b>Cto</b>  | <b>0,76</b> | -0,46       | <b>0,65</b> | <b>0,73</b> | <b>0,71</b> | 0,15        | <b>0,75</b> | <b>0,65</b> | <b>0,70</b> | <b>0,69</b> | <b>0,68</b> | <b>0,71</b> | <b>1,00</b> |             |
| <b>Cte</b>  | <b>0,77</b> | -0,45       | <b>0,66</b> | <b>0,73</b> | <b>0,71</b> | 0,15        | <b>0,76</b> | <b>0,65</b> | <b>0,70</b> | <b>0,70</b> | <b>0,68</b> | <b>0,71</b> | <b>1,00</b> | <b>1,00</b> |

A análise de correlação mede o grau de associação entre variáveis oscilando entre os limites de +1 a -1, quando positiva demonstra uma relação direta em que o aumento de uma está associado ao aumento da outra, mas não necessariamente indicando dependência entre elas. E quando negativa, a relação é inversa. Dentro dos limites de 0 a 1 há uma gama de valores que expressam os diferentes graus de associação. Assim, como termo de comparação a fim de aquilatar se os valores de “r” é alto ou baixo, adotaremos a tabela de Rugg (**Tabela 4.5**) (SOUNIS,1975).

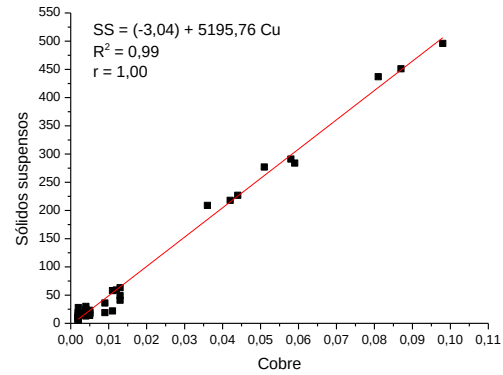
**Tabela 4.5** – Tabela de Rugg para aquilatar os valores do coeficiente de correlação de Pearson.

| Valor do coeficiente de correlação Pearson | Conceito    |
|--------------------------------------------|-------------|
| $r < 0,15$                                 | Desprezível |
| $0,15 < r < 0,29$                          | Baixo       |
| $0,30 < r < 0,49$                          | Apreciável  |
| $r > 0,50$                                 | Acentuado   |
| 1                                          | Perfeito    |

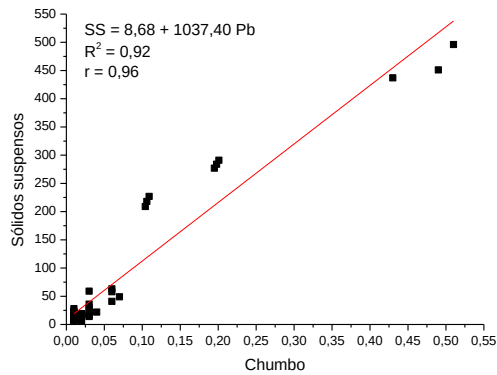
Foi feita análise de regressão dos dados de sólidos suspensos e metais a fim de possibilitar a estimativa de valores de parâmetros através dos valores de outros parâmetros, em futuras pesquisas, conforme **Figuras 4.19 a 4.25**.



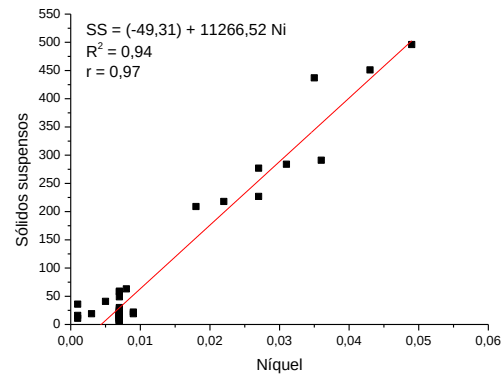
**Figura 4.19** – Análise de regressão SS x Cr.



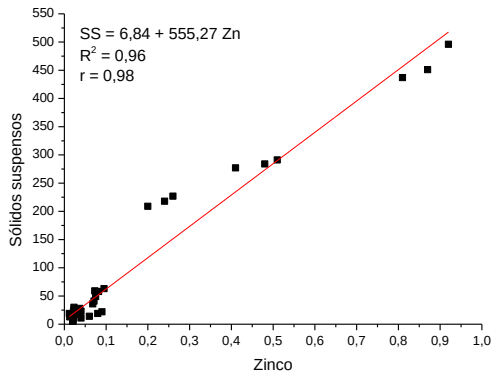
**Figura 4.20** – Análise de regressão SS x Cu.



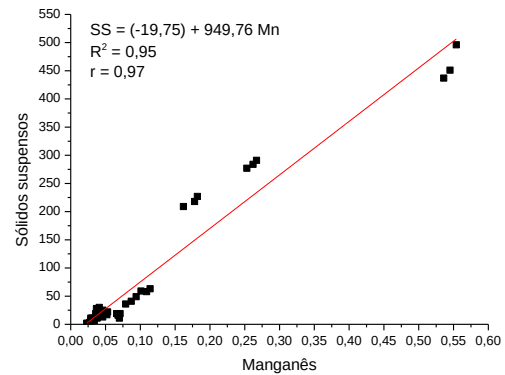
**Figura 4.21** – Análise de regressão SS x Pb.



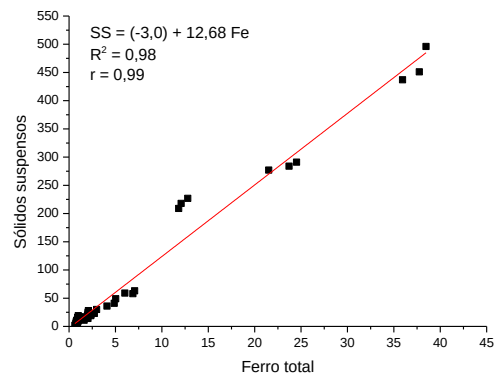
**Figura 4.22** – Análise de regressão SS x Ni.



**Figura 4.23** – Análise de regressão SS x Zn.



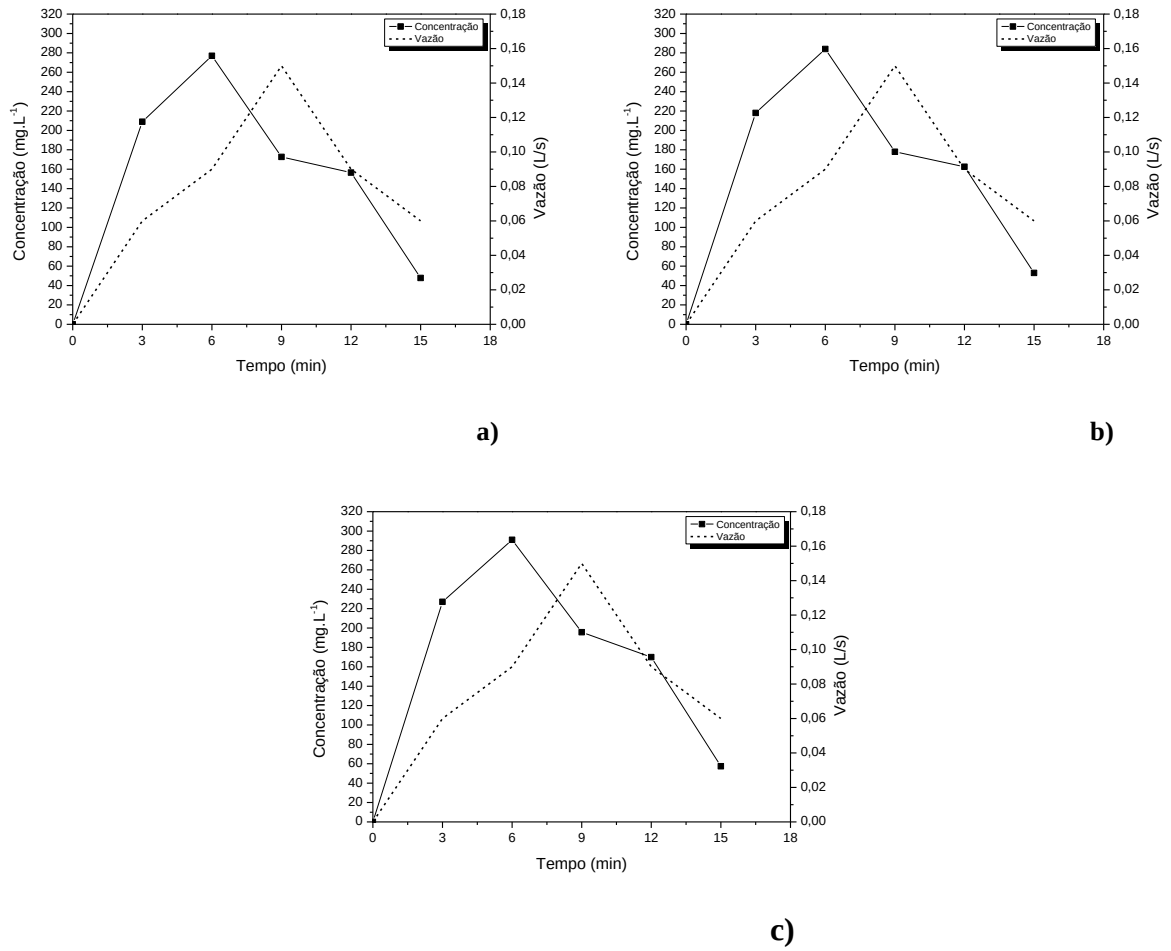
**Figura 4.24** – Análise de regressão SS x Mn.



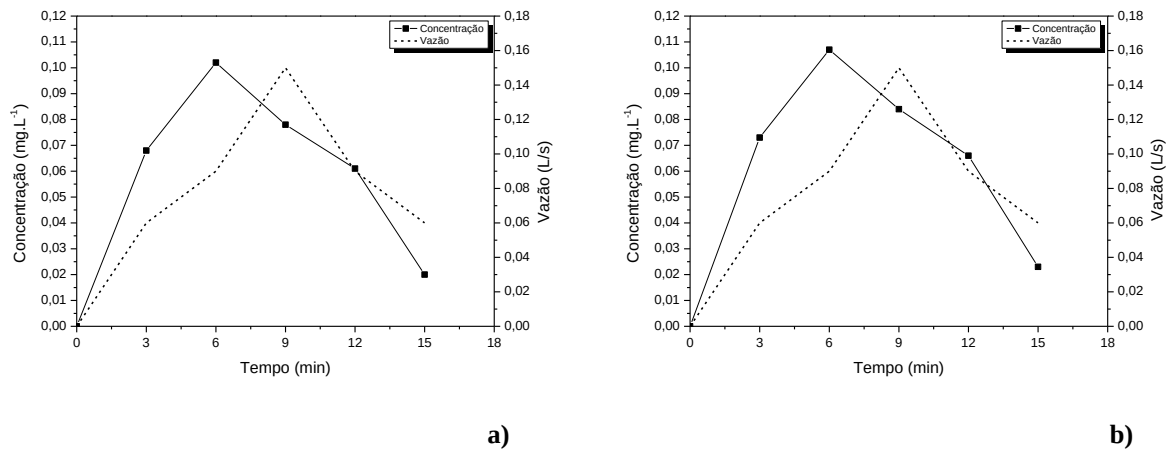
**Figura 4.25** – Análise de regressão SS x Fe.

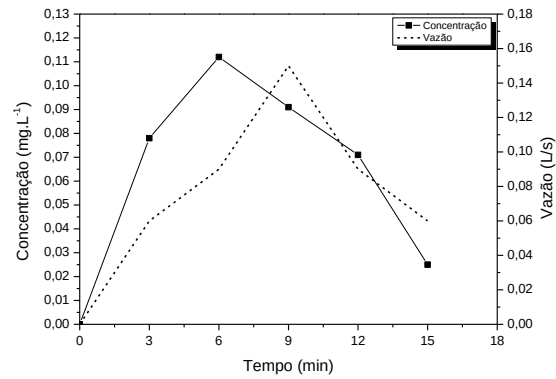
#### 4.2.4 Polutogramas

As **Figuras 4.26 a 4.34** apresentam gráficos que relacionam a vazão e a concentração de poluentes nos três períodos amostrais durante os eventos de chuva simulados.



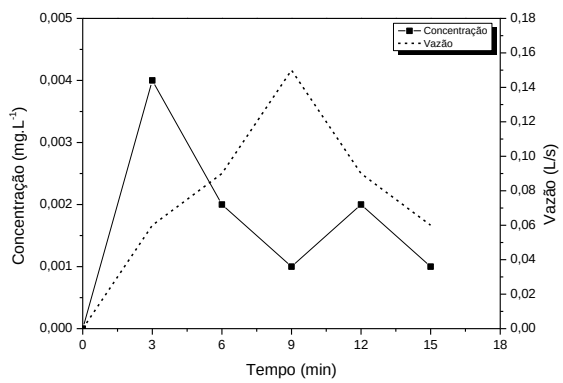
**Figura 4.26** – Polutograma de sólidos suspensos: **(a)** Evento 11/06; **(b)** Evento 19/06; **(c)** Evento 04/07.



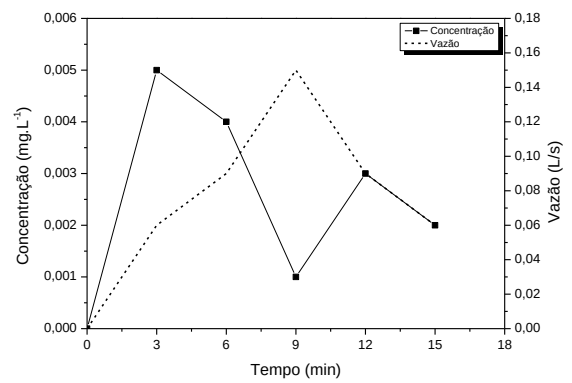


c)

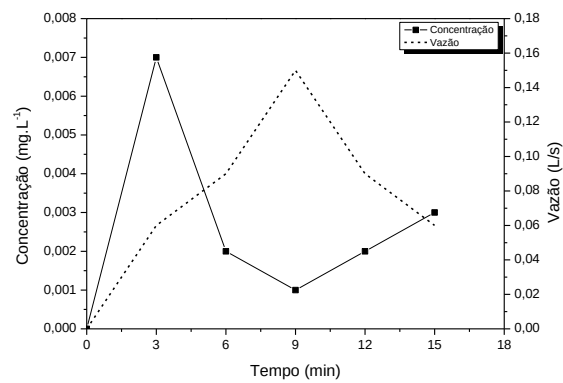
**Figura 4.27** – Polutograma de cromo: (a) Evento 11/06; (b) Evento 19/06; (c) Evento 04/07.



a)



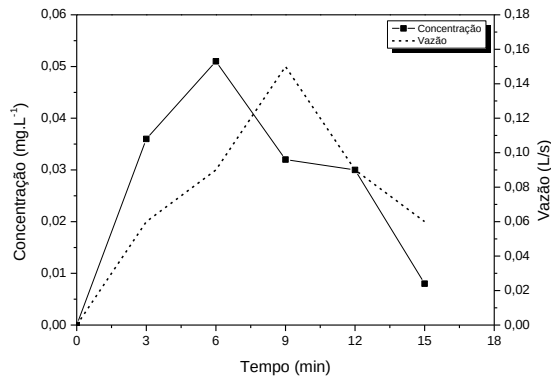
b)



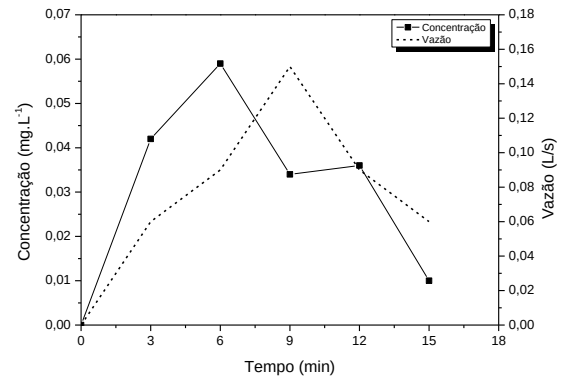
c)

**Figura 4.28** – Polutograma de cádmio: (a) Evento 11/06; (b) Evento 19/06; (c) Evento 04/07.

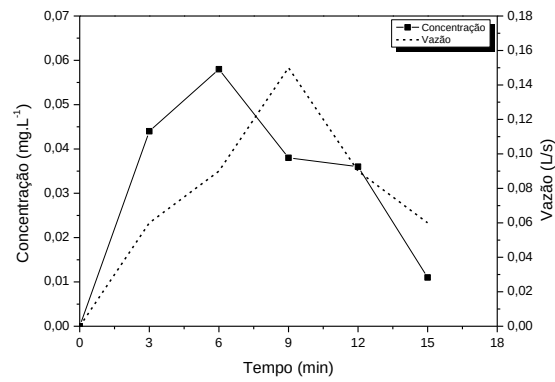




a)

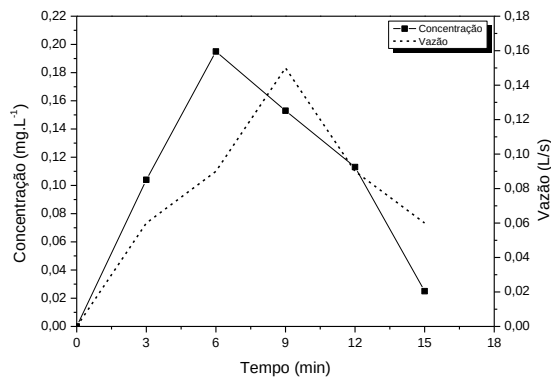


b)

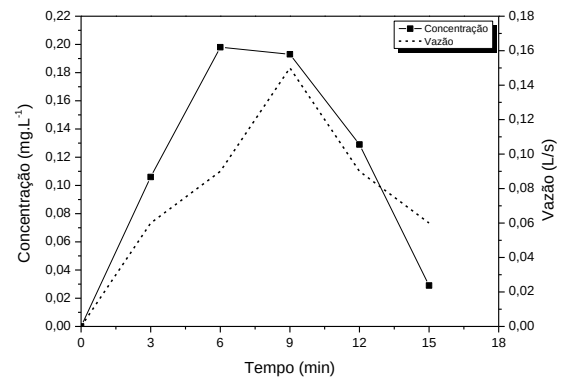


c)

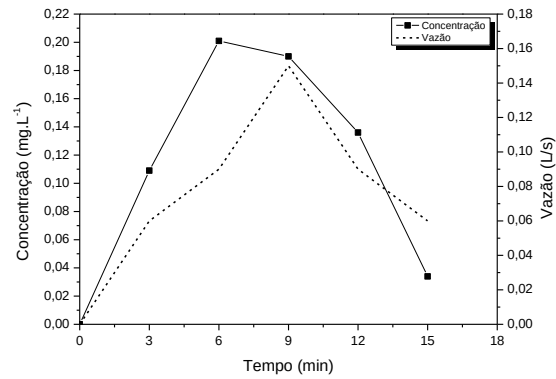
**Figura 4.29** – Polutograma de cobre: (a) Evento 11/06; (b) Evento 19/06; (c) Evento 04/07.



a)

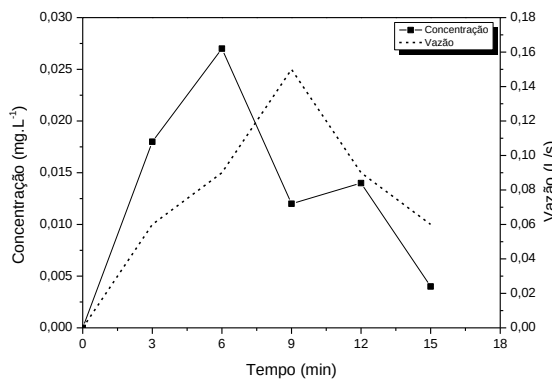


b)

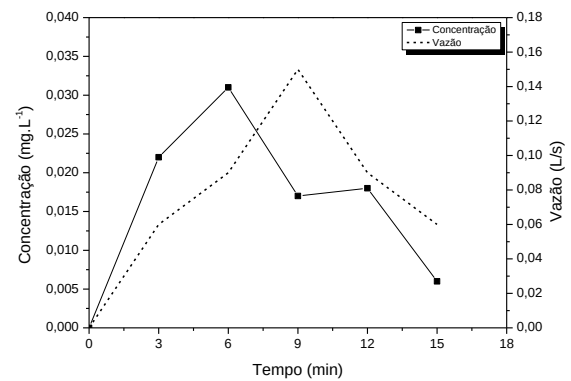


c)

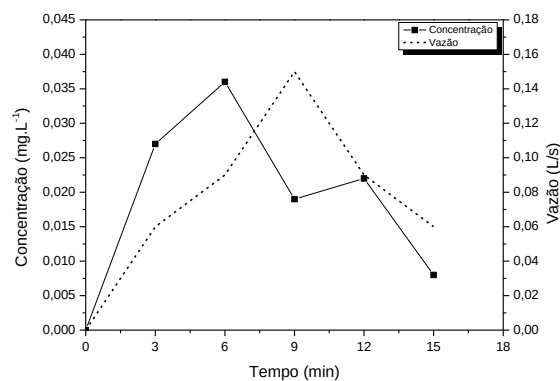
**Figura 4.30 – Polutograma de chumbo: (a) Evento 11/06; (b) Evento 19/06; (c) Evento 04/07.**



a)

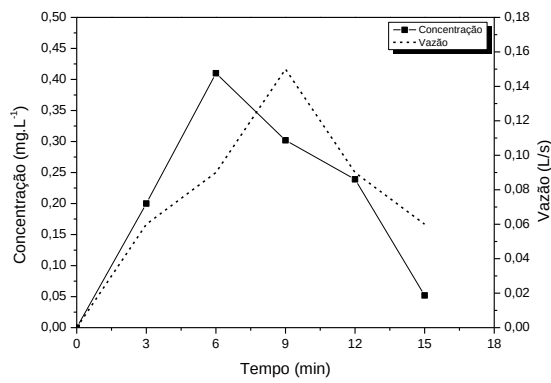


b)

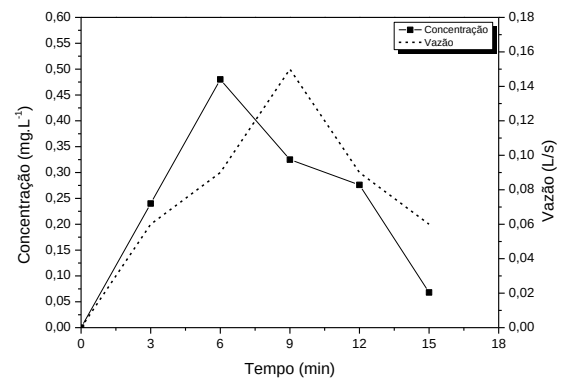


c)

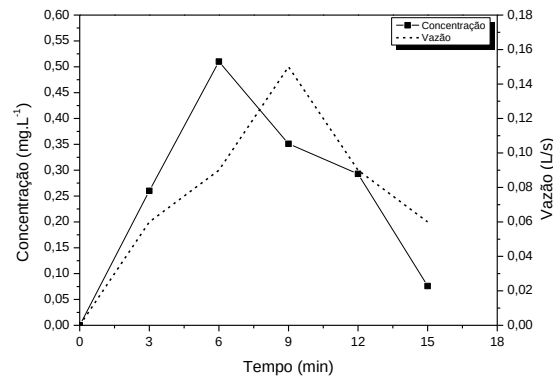
**Figura 4.31 – Polutograma de níquel: (a) Evento 11/06; (b) Evento 19/06; (c) Evento 04/07.**



a)

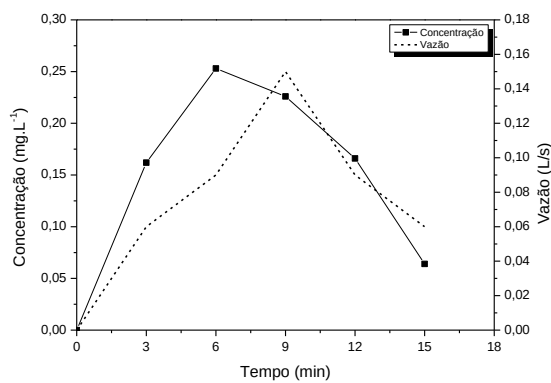


b)

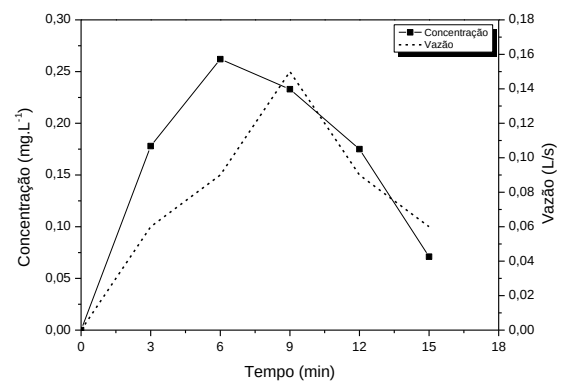


c)

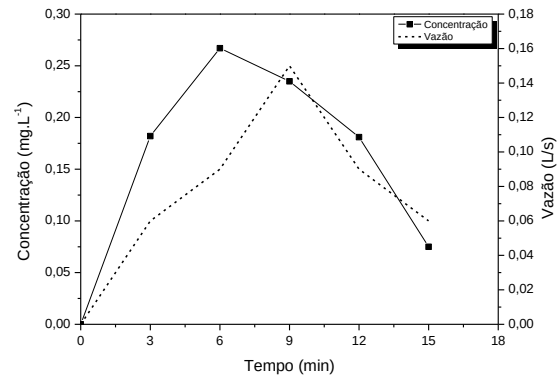
**Figura 4.32 – Polutograma de zinco: (a) Evento 11/06; (b) Evento 19/06; (c) Evento 04/07.**



a)

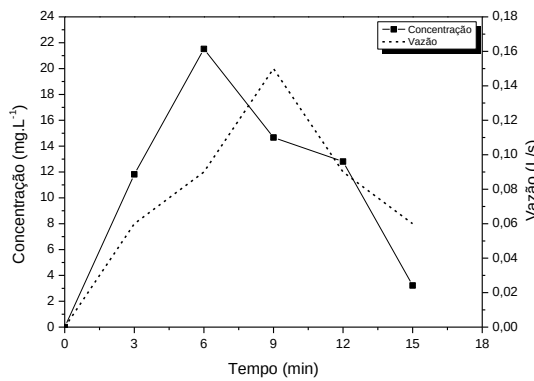


b)

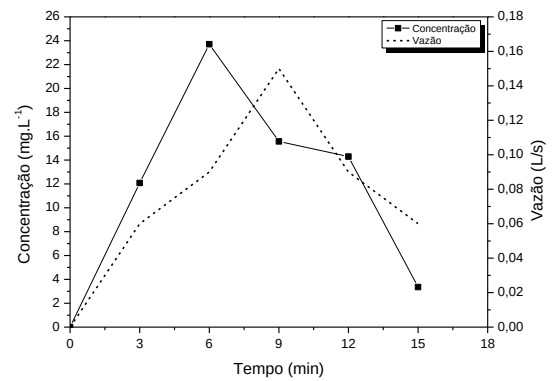


c)

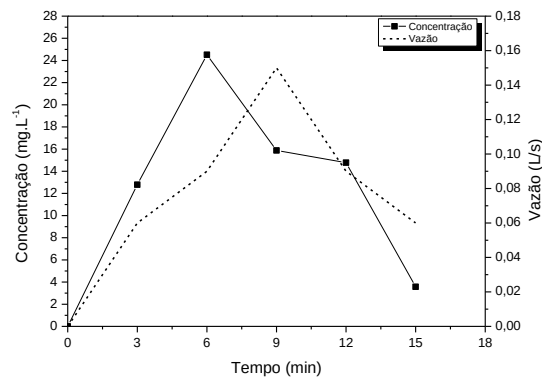
**Figura 4.33 – Polutograma de manganês: (a) Evento 11/06; (b) Evento 19/06; (c) Evento 04/07.**



a)



b)



c)

**Figura 4.34 – Polutograma de ferro: (a) Evento 11/06; (b) Evento 19/06; (c) Evento 04/07.**

Pode-se constatar um comportamento inicial semelhante para os parâmetros sólidos suspensos, cromo, cobre, chumbo, zinco, manganês e ferro, nos três eventos simulados. A concentração desses parâmetros no início da precipitação é mais elevada, apresentando um pico de concentração antes do pico do hidrograma.

Após este pico, há uma redução no valor da concentração o qual mantém certa proporcionalidade com a variação da vazão, pois nota-se que, em geral, o aumento da concentração ao longo do evento ocorre juntamente com os picos da vazão. Esta variação também foi observada por outros autores em trabalhos semelhantes, como Dotto (2006).

Por outro lado, para os parâmetros níquel e cádmio, a irregularidade na variação da concentração com a variação da vazão pode ter ocorrido devido esses poluentes não terem a sua maior parte carregada nos primeiros momentos da drenagem, o que ocorreu com os demais poluentes analisados, levando a essa variação durante o evento total, talvez pelo fato de desprenderem com maior dificuldade.

Entretanto, para a confirmação dessa hipótese, mais eventos devem ser amostrados, além de pesquisar especificamente a interação desses poluentes com a água e com a superfície. Deletic (1998) observou esse acontecimento e relatou que isto pode ser explicado pelo fato de alguns poluentes apresentarem maior facilidade de transporte e desprendimento.

#### **4.2.5 Estimativa do coeficiente de Wash-off**

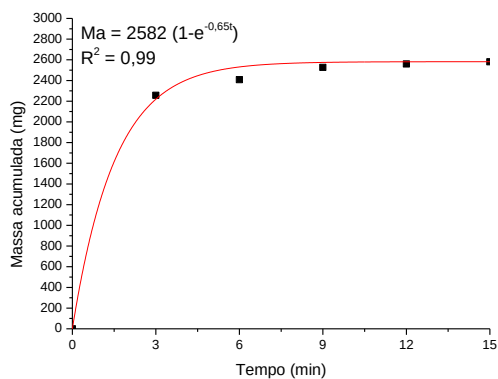
Diferentes aplicações da equação de wash-off têm sido utilizadas em vários modelos de qualidade de águas pluviais, tais como, USEPA's Stormwater Management Model (SWMM) e US Army Corps's STORM model, conforme cita Huber e Dickinson (1988).

Neste estudo, a equação exponencial original (**Equação 2.5** – pg. 54) proposta por Sartor *et al.*, (1974) foi testada a fim de representar os padrões observados do wash-off, sendo reproduzida satisfatoriamente, assim como Egodawatta *et al.*, (2007), que relataram desempenho satisfatório da equação de wash-off em um estudo semelhante.

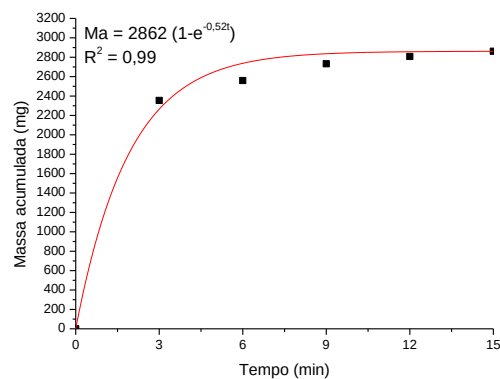
A equação proposta avaliada nesta pesquisa baseia-se na suposição que cada evento de chuva tem a capacidade de remover todos os poluentes disponíveis na superfície se permanecesse durante um período adequado.

O coeficiente de wash-off  $K$  é um parâmetro empírico com unidade ( $\text{mm}^{-1}$ ) e nenhum significado físico direto. Millar (1999) relata que o valor de  $K$  é específico do local e pode variar com o tipo de poluente, a intensidade da precipitação e a área de captação.

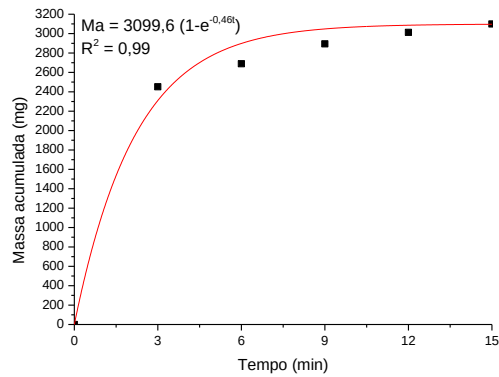
Neste estudo, os valores possíveis para  $K$  foram determinados usando-se o método dos mínimos quadrados. As **Figuras 4.35 a 4.61** ilustram a replicação da equação desenvolvida e a **Tabela 4.6** mostra os valores de  $k$  determinados para as diferentes áreas.



a)

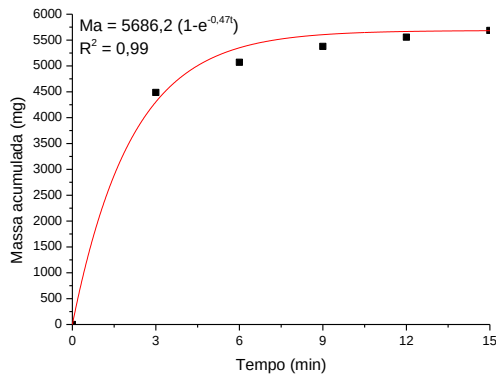


b)

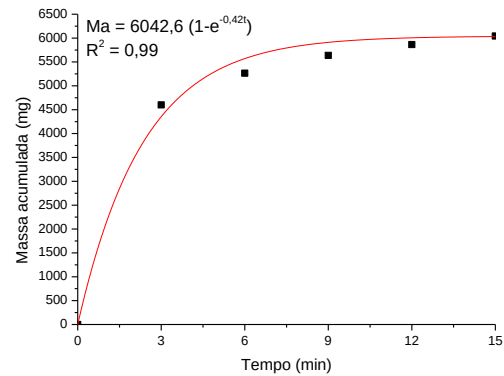


c)

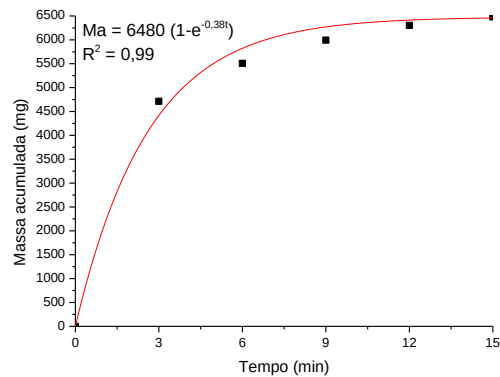
**Figura 4.35** – Wash-off de Sólidos Suspensos para  $I = 69 \text{ mm/h}$  nos diferentes eventos: (a) Evento 11/06/12; (b) Evento 19/06/12; (c) Evento 04/07/12.



a)

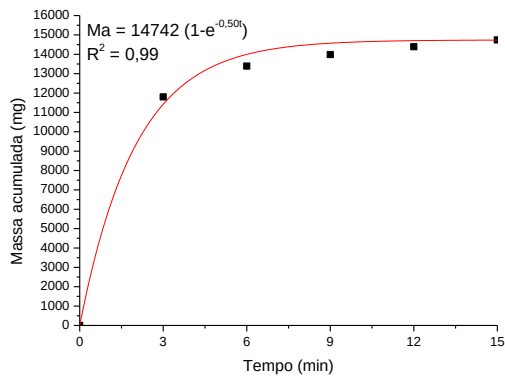


b)

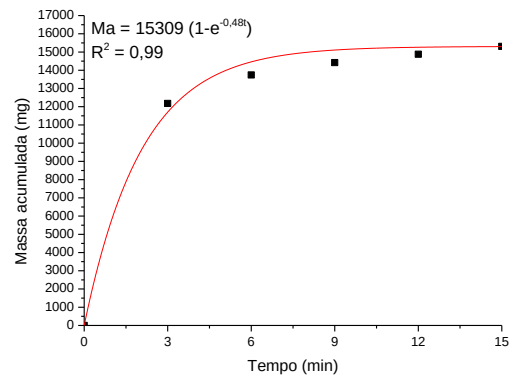


c)

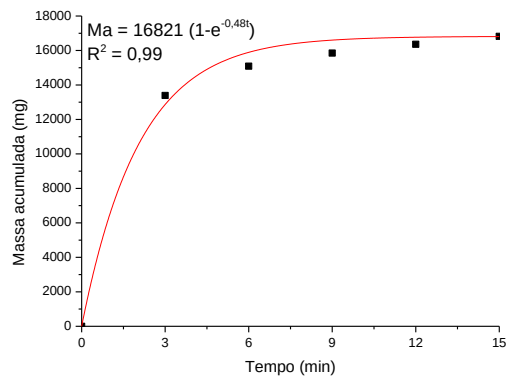
**Figura 4.36** – Wash-off de Sólidos Suspensos para  $I = 109 \text{ mm/h}$  nos diferentes eventos: (a) Evento 11/06/12; (b) Evento 19/06/12; (c) Evento 04/07/12.



a)

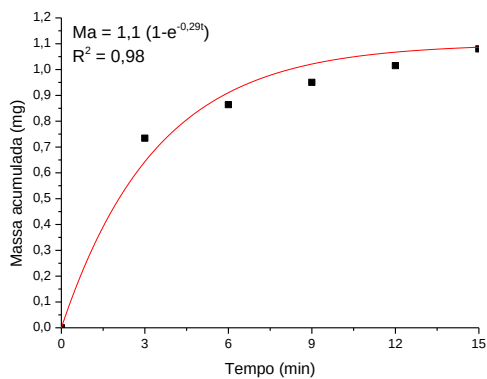


b)

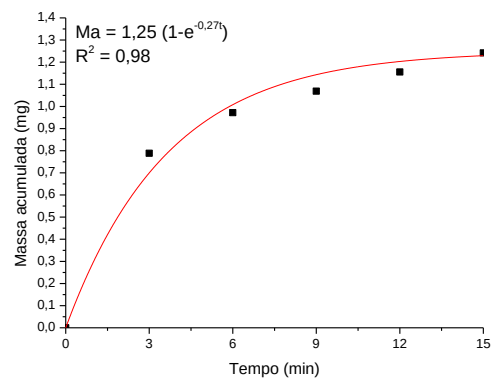


c)

**Figura 4.37** – Wash-off de Sólidos Suspensos para  $I = 180\text{mm/h}$  nos diferentes eventos: (a) Evento 11/06/12; (b) Evento 19/06/12; (c) Evento 04/07/12.

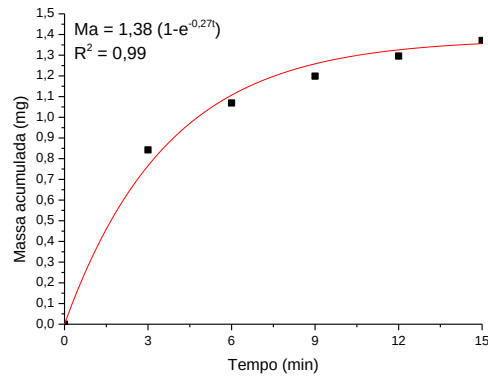


a)



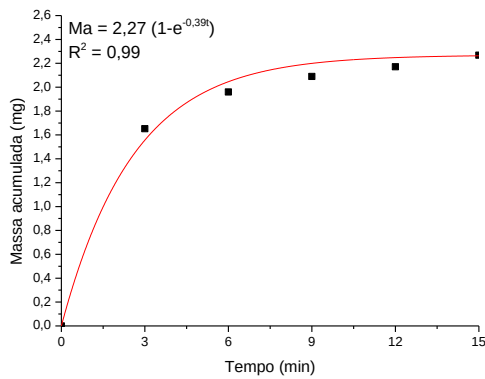
b)



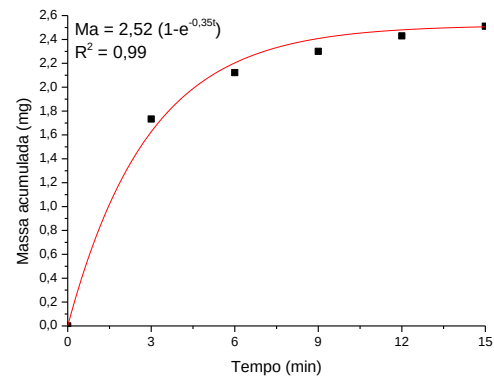


c)

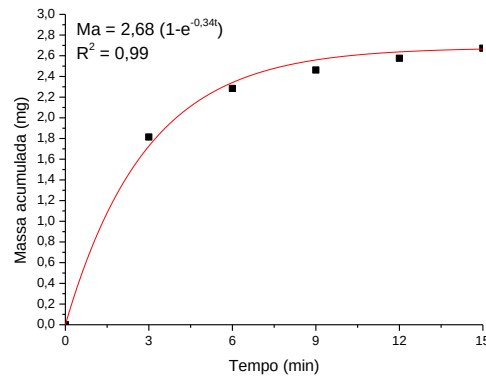
**Figura 4.38** – Wash-off de Cromo para I = 69mm/h nos diferentes eventos: (a) Evento 11/06/12; (b) Evento 19/06/12; (c) Evento 04/07/12.



a)

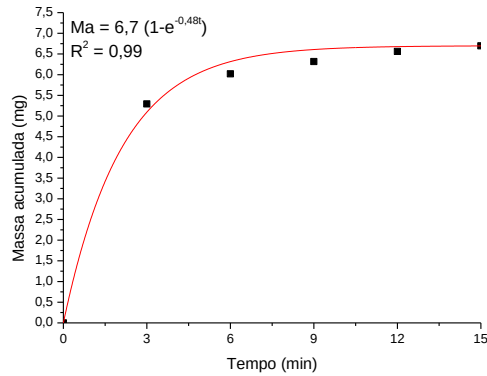


b)

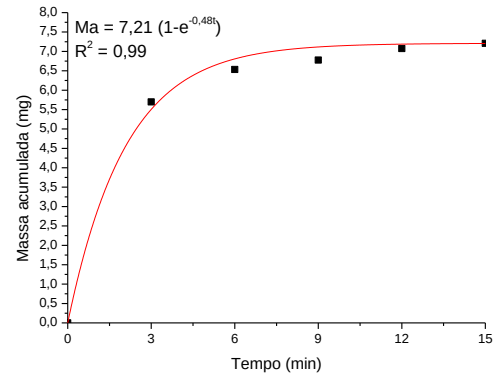


c)

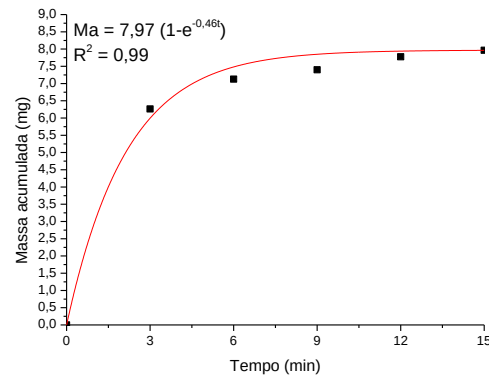
**Figura 4.39** – Wash-off de Cromo para I = 109mm/h nos diferentes eventos: (a) Evento 11/06/12; (b) Evento 19/06/12; (c) Evento 04/07/12.



a)

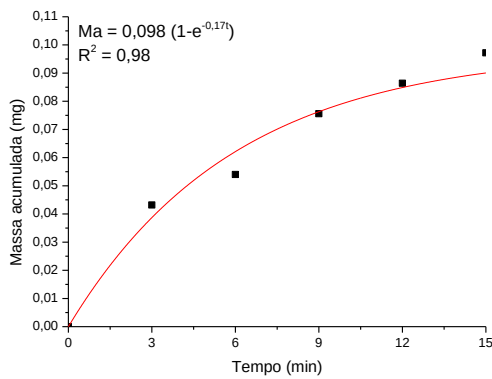


b)

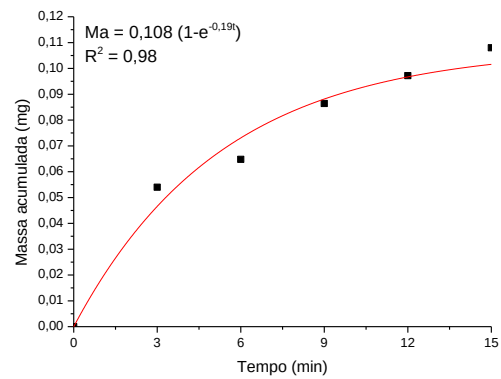


c)

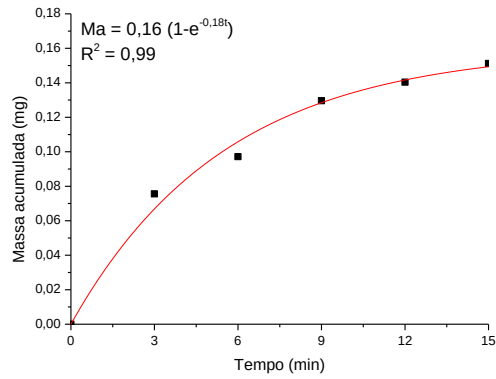
**Figura 4.40** – Wash-off de Cromo para  $I = 180\text{mm/h}$  nos diferentes eventos: (a) Evento 11/06/12; (b) Evento 19/06/12; (c) Evento 04/07/12.



a)

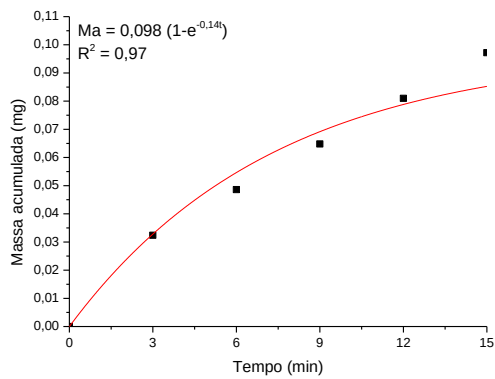


b)

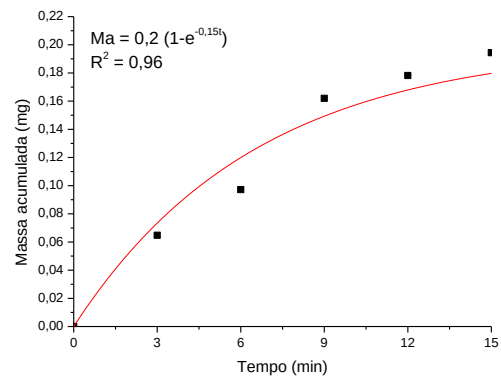


c)

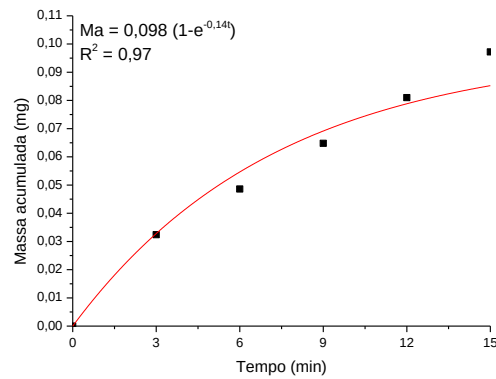
**Figura 4.41** – Wash-off de Cádmiu para  $I = 69\text{mm/h}$  nos diferentes eventos: (a) Evento 11/06/12; (b) Evento 19/06/12; (c) Evento 04/07/12.



a)

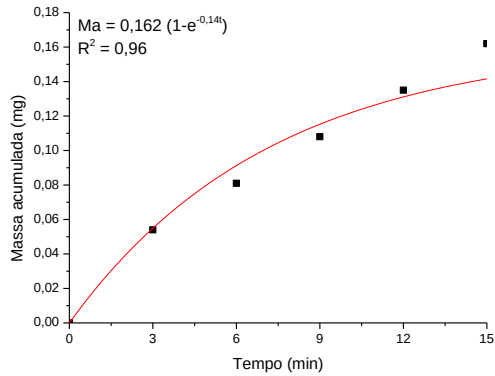


b)

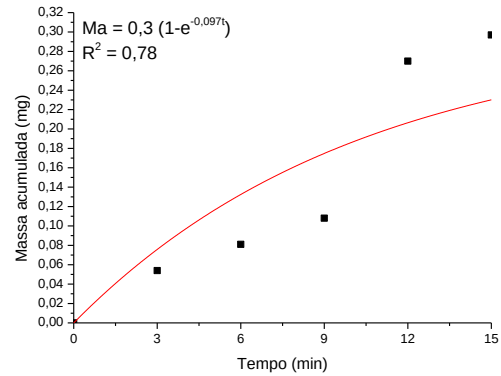


c)

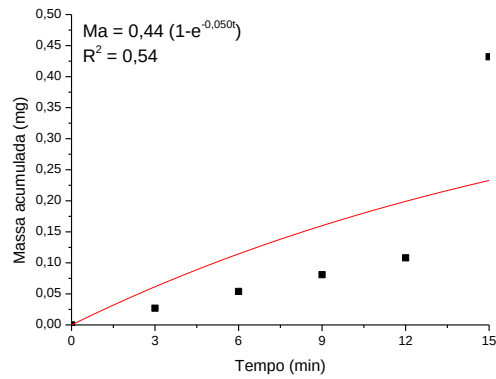
**Figura 4.42** – Wash-off de Cádmiu para  $I = 109\text{mm/h}$  nos diferentes eventos: (a) Evento 11/06/12; (b) Evento 19/06/12; (c) Evento 04/07/12.



a)

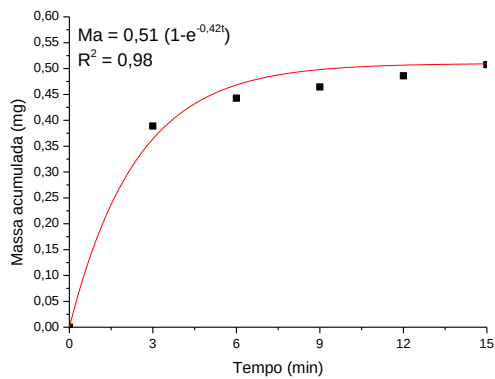


b)

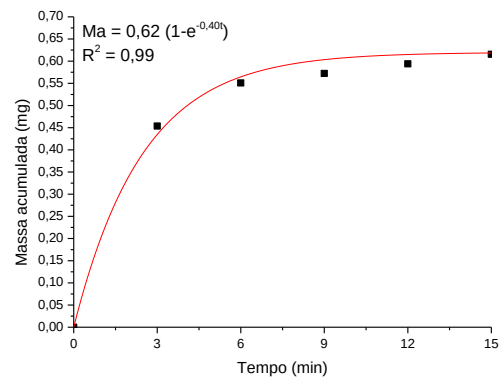


c)

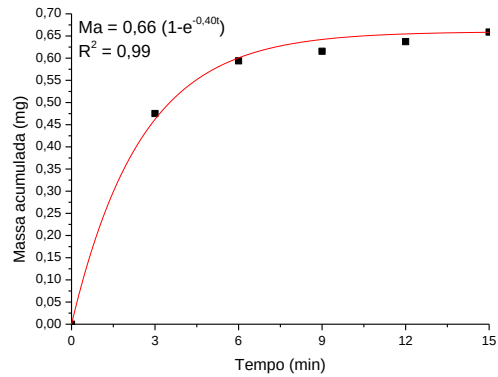
**Figura 4.43** – Wash-off de Cádmiu para  $I = 180\text{mm/h}$  nos diferentes eventos: (a) Evento 11/06/12; (b) Evento 19/06/12; (c) Evento 04/07/12.



a)

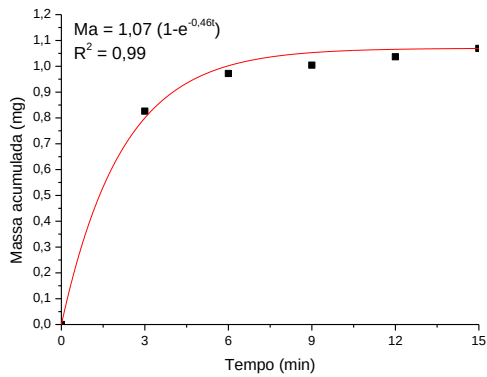


b)

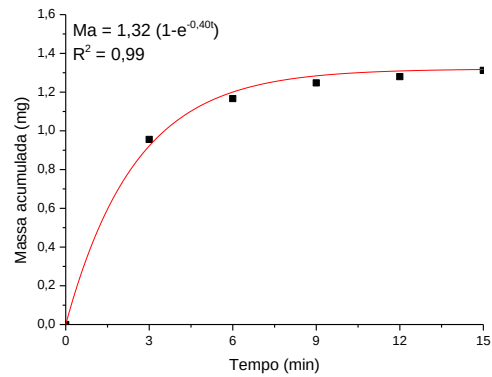


c)

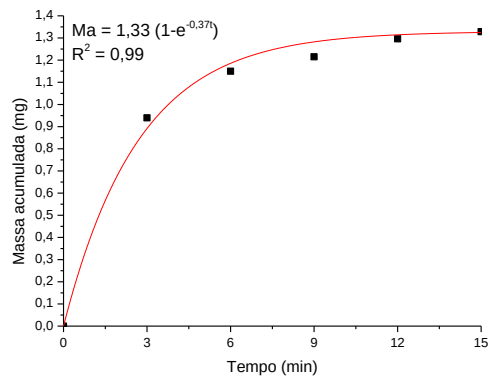
**Figura 4.44** – Wash-off de Cobre para I = 69mm/h nos diferentes eventos: (a) Evento 11/06/12; (b) Evento 19/06/12; (c) Evento 04/07/12.



a)

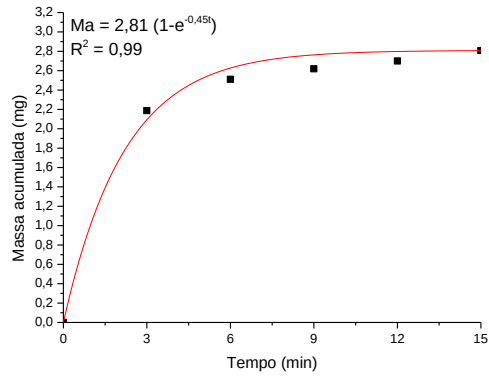


b)

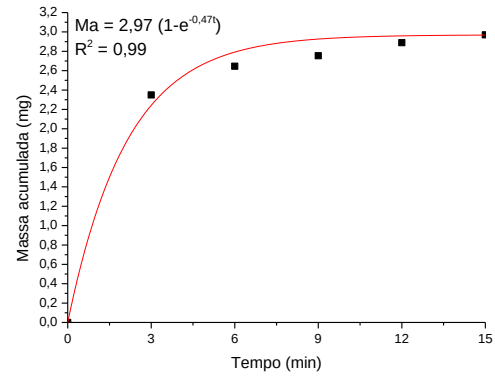


c)

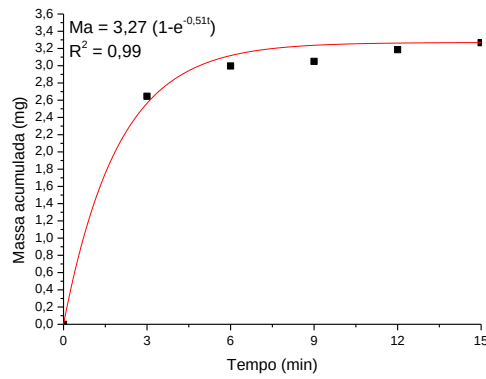
**Figura 4.45** – Wash-off de Cobre para I = 109mm/h nos diferentes eventos: (a) Evento 11/06/12; (b) Evento 19/06/12; (c) Evento 04/07/12.



a)

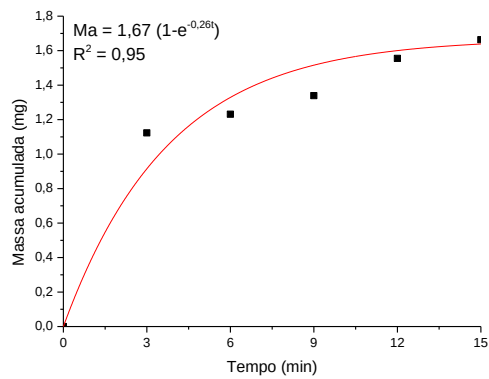


b)

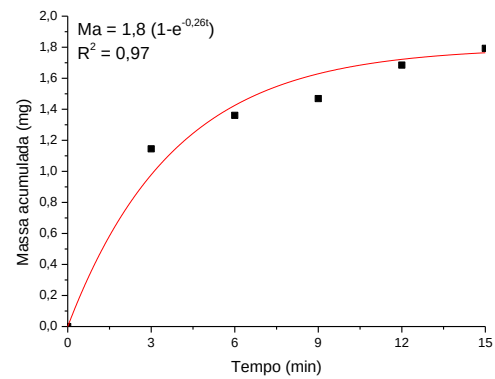


c)

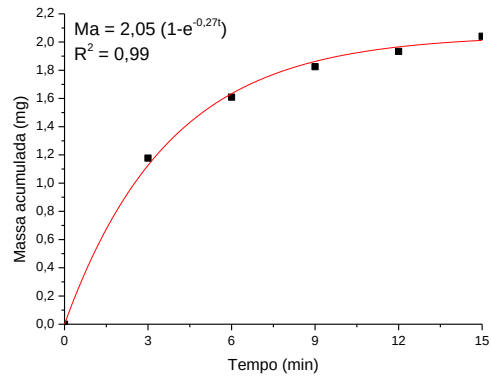
**Figura 4.46** – Wash-off de Cobre para  $I = 180\text{mm/h}$  nos diferentes eventos: (a) Evento 11/06/12; (b) Evento 19/06/12; (c) Evento 04/07/12.



a)

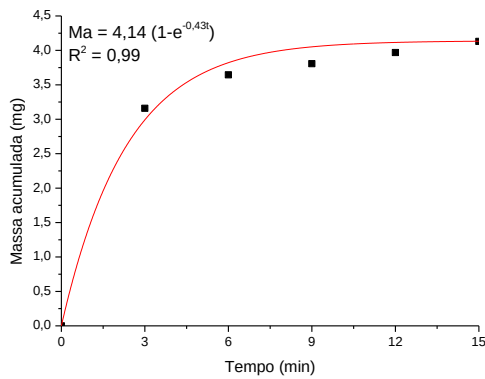


b)

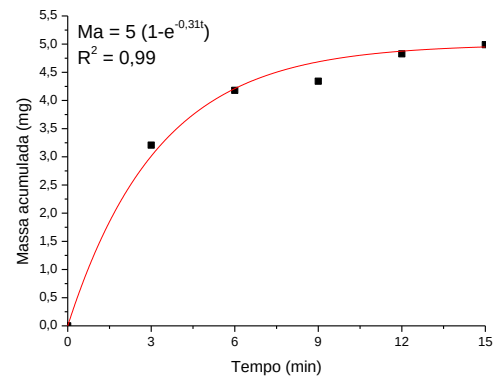


c)

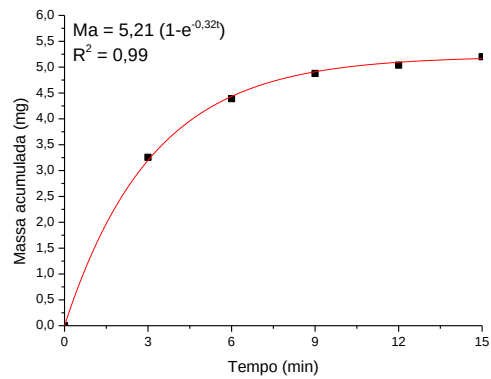
**Figura 4.47** – Wash-off de Chumbo para  $I = 69\text{mm/h}$  nos diferentes eventos: (a) Evento 11/06/12; (b) Evento 19/06/12; (c) Evento 04/07/12.



a)

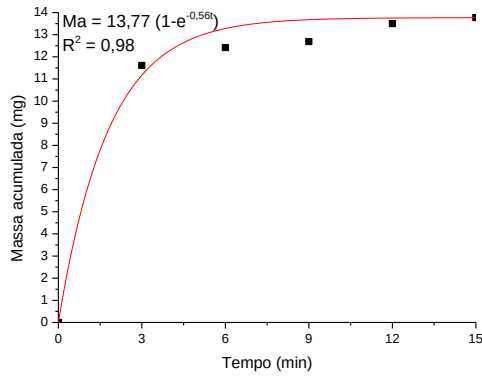


b)

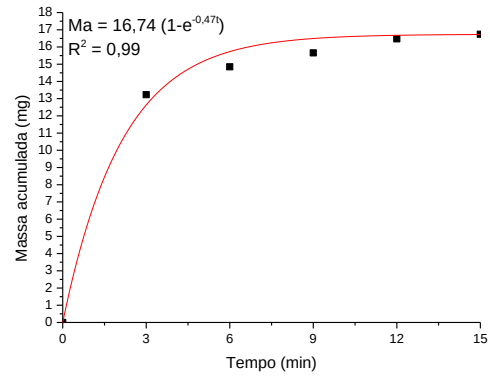


c)

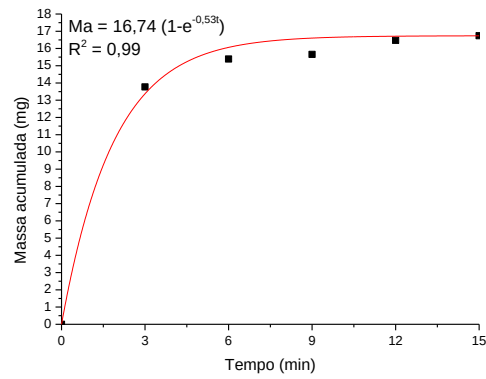
**Figura 4.48** – Wash-off de Chumbo para  $I = 109\text{mm/h}$  nos diferentes eventos: (a) Evento 11/06/12; (b) Evento 19/06/12; (c) Evento 04/07/12.



a)

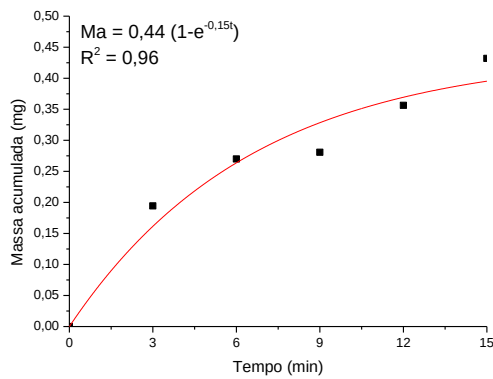


b)

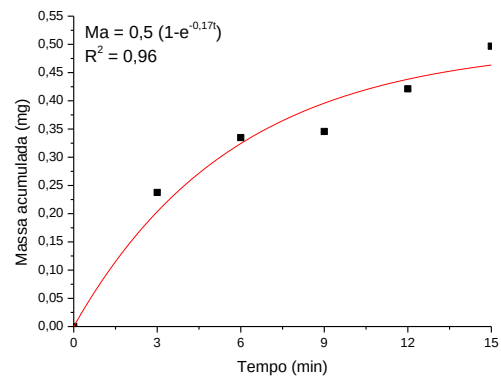


c)

**Figura 4.49** – Wash-off de Chumbo para  $I = 180\text{mm/h}$  nos diferentes eventos: (a) Evento 11/06/12; (b) Evento 19/06/12; (c) Evento 04/07/12.

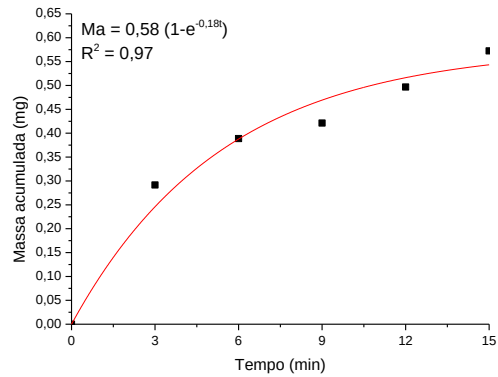


a)



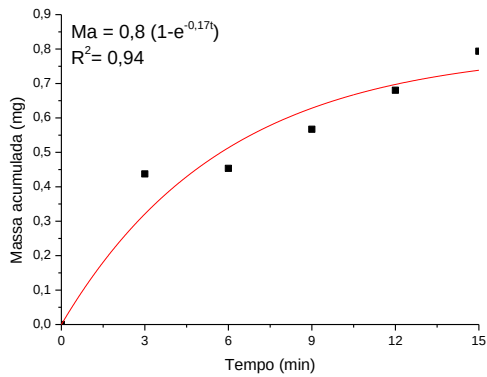
b)



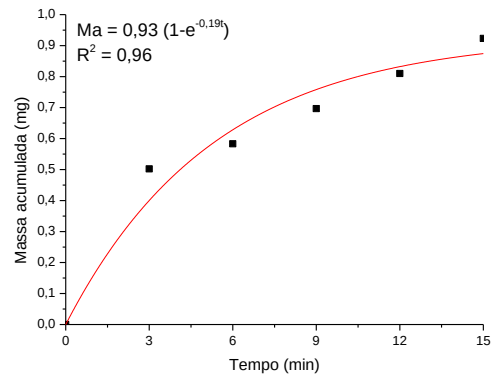


c)

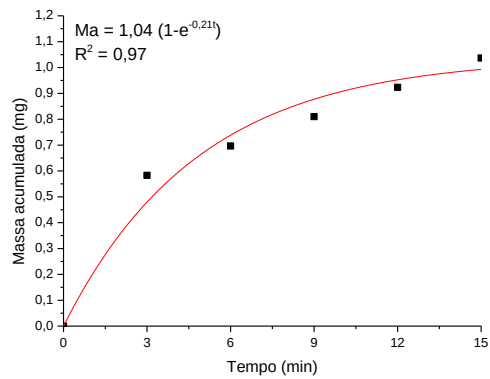
**Figura 4.50** – Wash-off de Níquel para  $I = 69 \text{ mm/h}$  nos diferentes eventos: (a) Evento 11/06/12; (b) Evento 19/06/12; (c) Evento 04/07/12.



a)

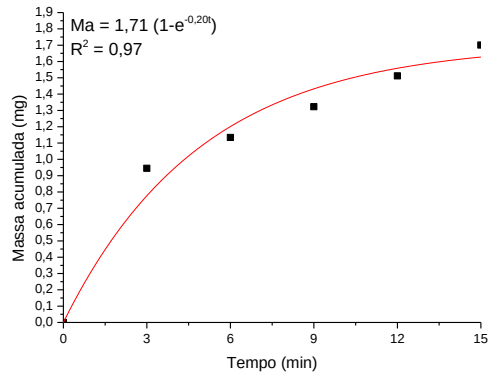


b)

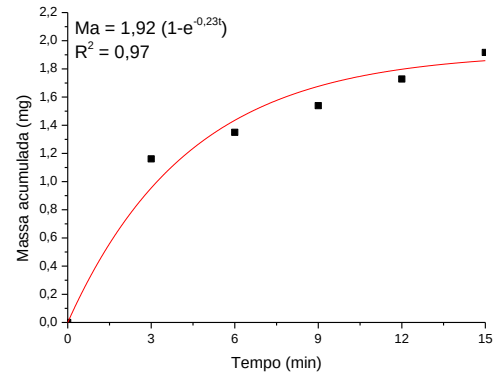


c)

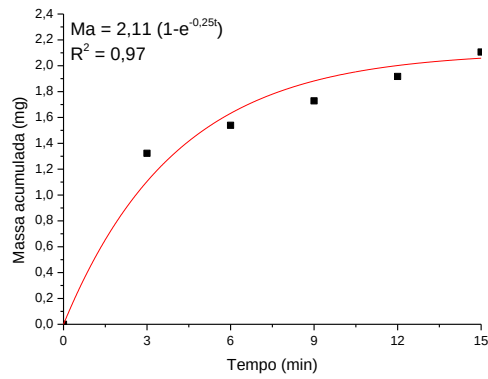
**Figura 4.51** – Wash-off de Níquel para  $I = 109 \text{ mm/h}$  nos diferentes eventos: (a) Evento 11/06/12; (b) Evento 19/06/12; (c) Evento 04/07/12.



a)

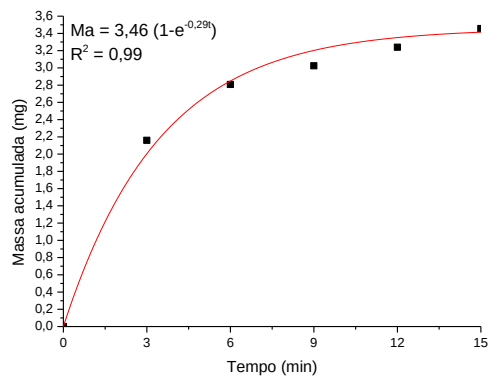


b)

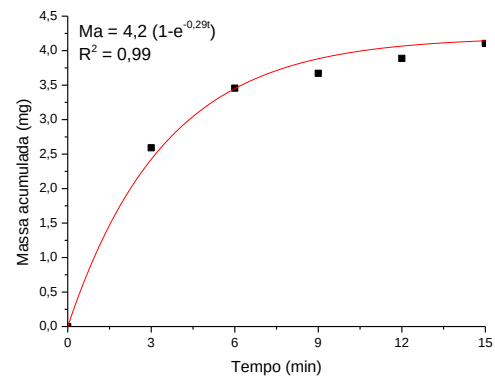


c)

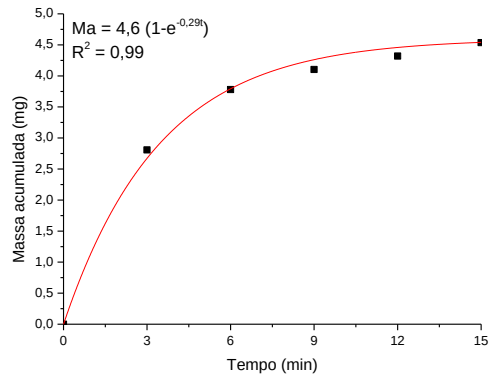
**Figura 4.52** – Wash-off de Níquel para  $I = 180\text{mm/h}$  nos diferentes eventos: (a) Evento 11/06/12; (b) Evento 19/06/12; (c) Evento 04/07/12.



a)

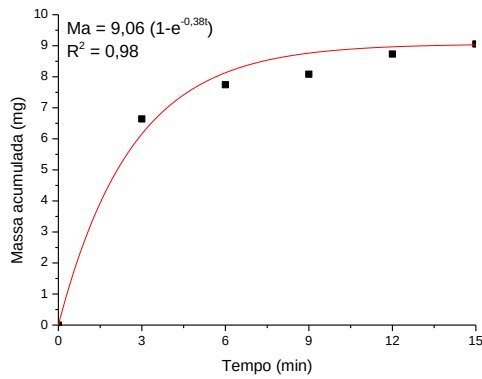


b)

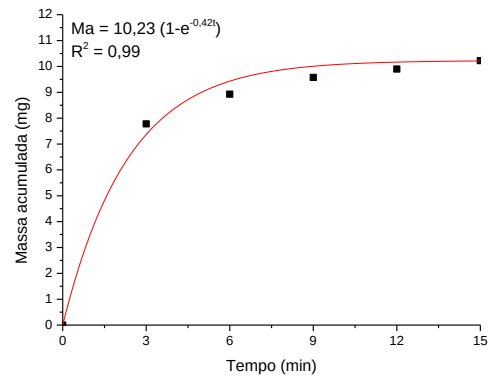


c)

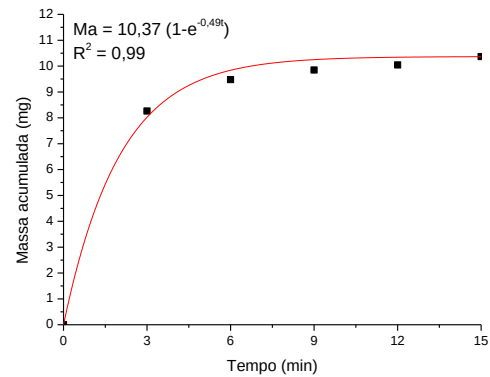
**Figura 4.53** – Wash-off de Zinco para  $I = 69\text{mm/h}$  nos diferentes eventos: (a) Evento 11/06/12; (b) Evento 19/06/12; (c) Evento 04/07/12.



a)

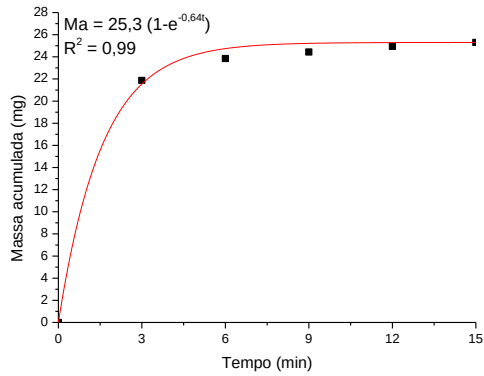


b)

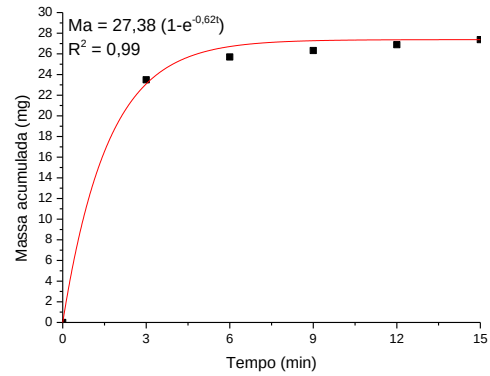


c)

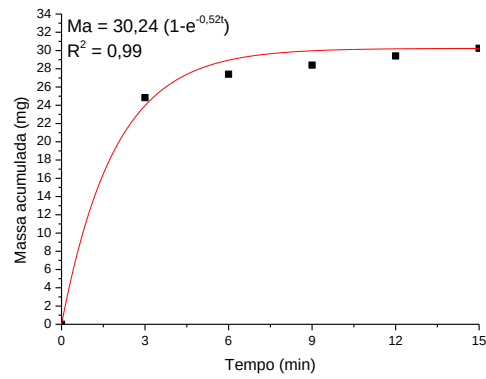
**Figura 4.54** – Wash-off de Zinco para  $I = 109\text{mm/h}$  nos diferentes eventos: (a) Evento 11/06/12; (b) Evento 19/06/12; (c) Evento 04/07/12.



a)

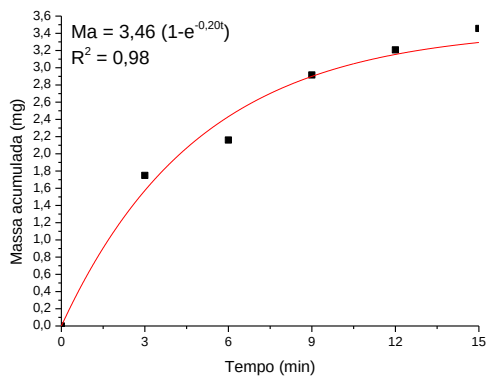


b)

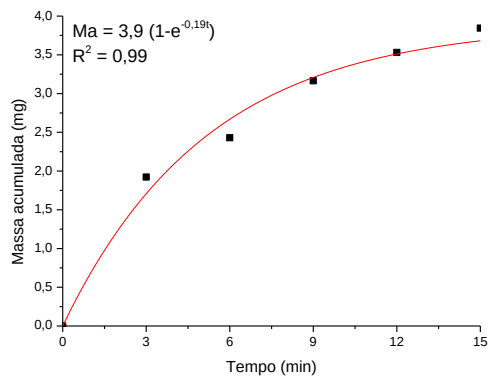


c)

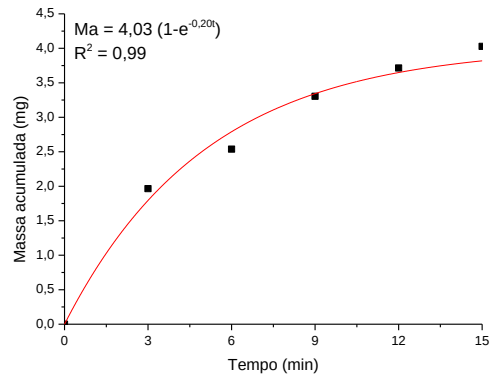
**Figura 4.55** – Wash-off de Zinco para  $I = 180\text{mm/h}$  nos diferentes eventos: (a) Evento 11/06/12; (b) Evento 19/06/12; (c) Evento 04/07/12.



a)

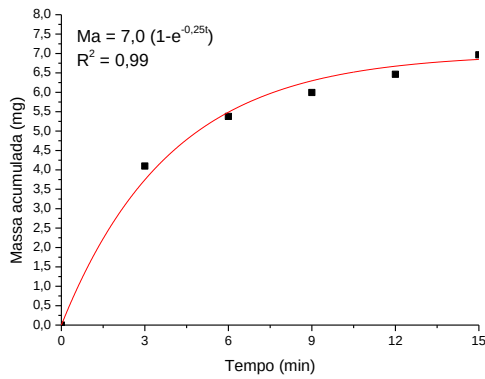


b)

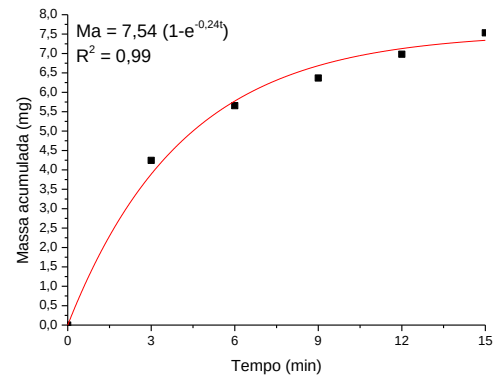


c)

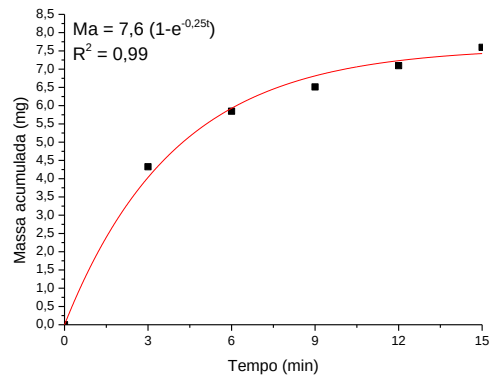
**Figura 4.56** – Wash-off de Manganês para  $I = 69\text{mm/h}$  nos diferentes eventos: (a) Evento 11/06/12; (b) Evento 19/06/12; (c) Evento 04/07/12.



a)

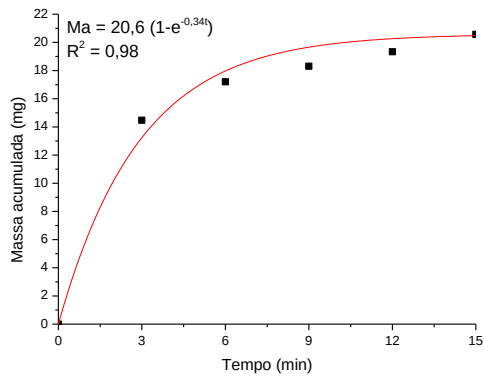


b)

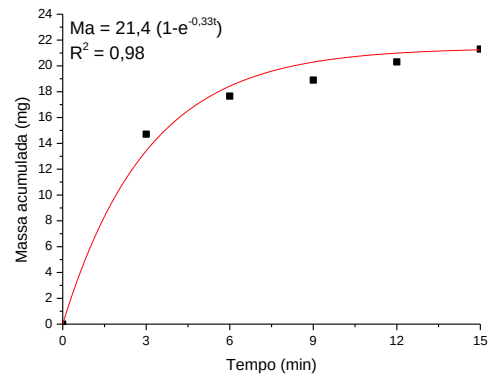


c)

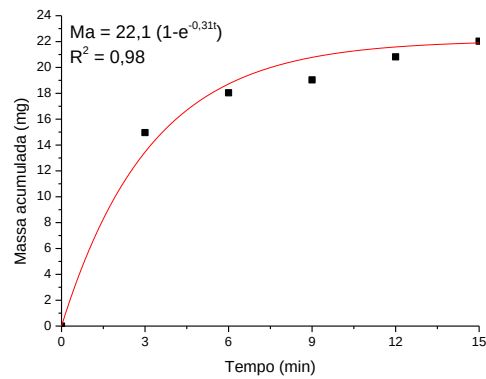
**Figura 4.57** – Wash-off de Manganês para  $I = 109\text{mm/h}$  nos diferentes eventos: (a) Evento 11/06/12; (b) Evento 19/06/12; (c) Evento 04/07/12.



a)

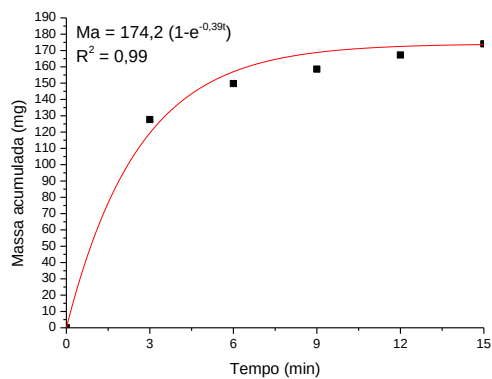


b)

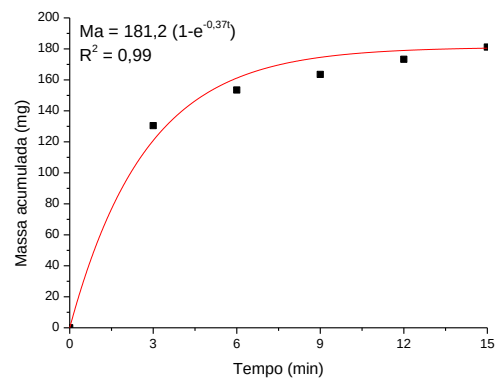


c)

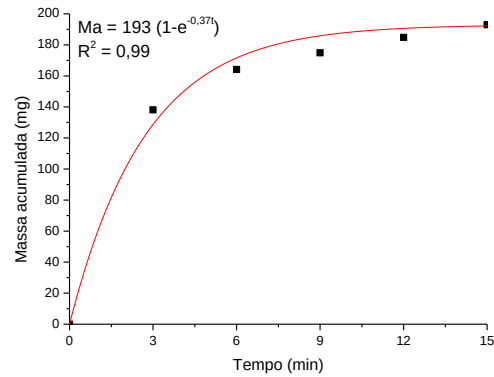
**Figura 4.58** – Wash-off de Manganês para  $I = 180\text{mm/h}$  nos diferentes eventos: (a) Evento 11/06/12; (b) Evento 19/06/12; (c) Evento 04/07/12.



a)

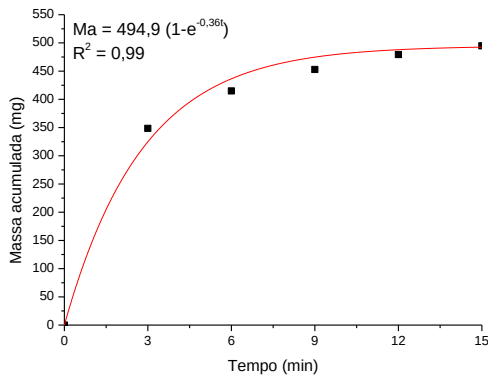


b)

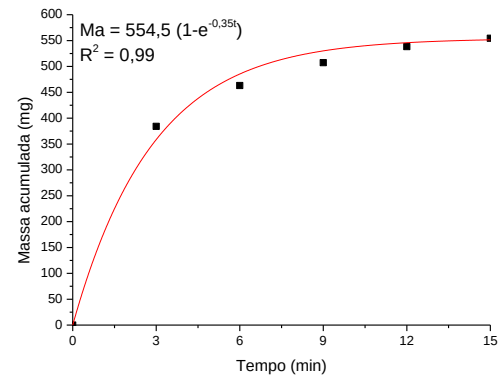


c)

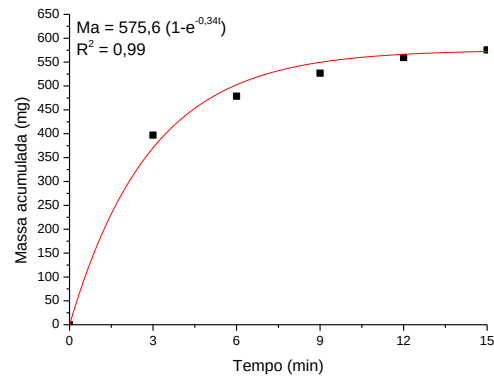
**Figura 4.59** – Wash-off de Ferro total para  $I = 69\text{mm/h}$  nos diferentes eventos: (a) Evento 11/06/12; (b) Evento 19/06/12; (c) Evento 04/07/12.



a)

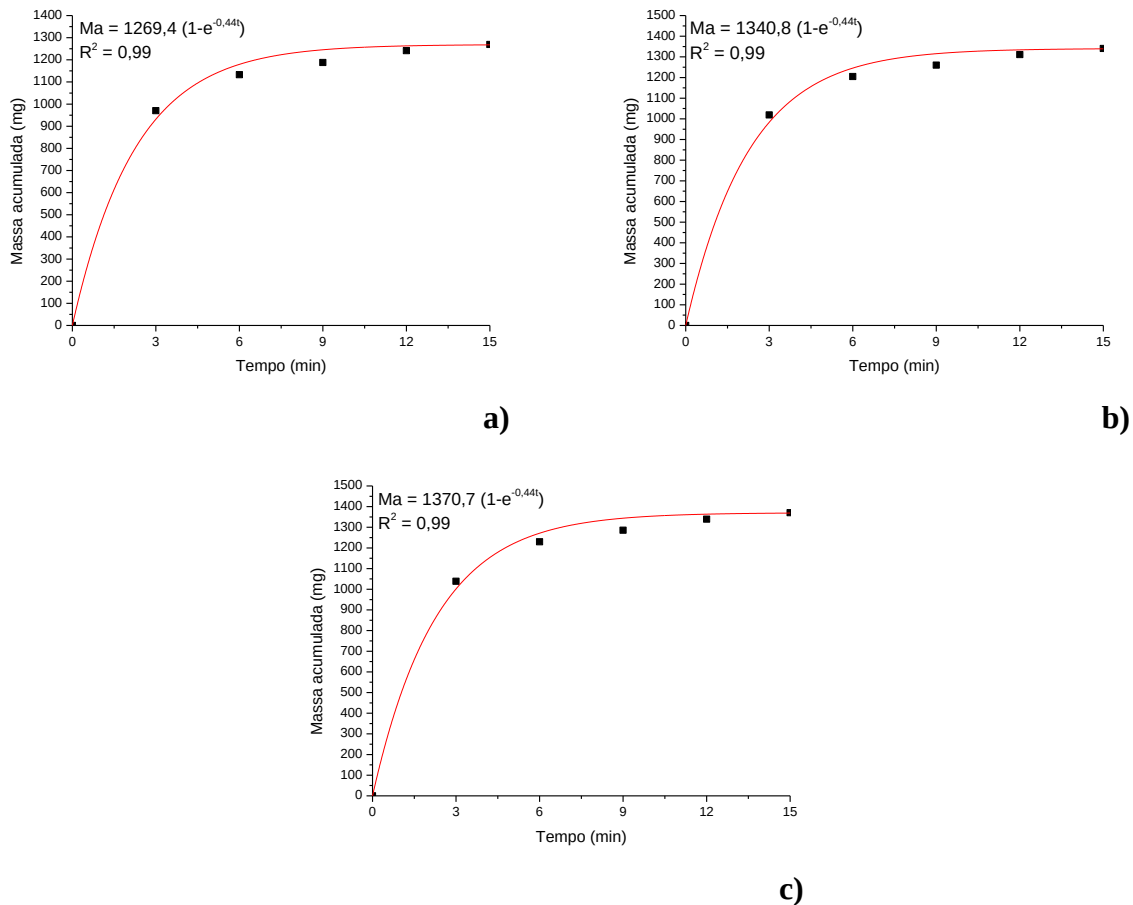


b)



c)

**Figura 4.60** – Wash-off de Ferro total para  $I = 109\text{mm/h}$  nos diferentes eventos: (a) Evento 11/06/12; (b) Evento 19/06/12; (c) Evento 04/07/12.



**Figura 4.61** – Wash-off de Ferro total para  $I = 180\text{mm/h}$  nos diferentes eventos: **(a)** Evento 11/06/12; **(b)** Evento 19/06/12; **(c)** Evento 04/07/12.

Durante todos os eventos simulados nas diferentes intensidades, houve a presença sistemática dos elementos analisados. Os valores encontrados dos elementos cromo, cobre, chumbo, níquel e zinco apresentaram uma variação similar durante o carreamento. Esses elementos, geralmente, são introduzidos por fontes cuja origem está na urbanização e industrialização. Já o elemento cádmio apresentou uma variação irregular comparado aos demais elementos em todas as análises da água do escoamento, apresentando um coeficiente mais baixo na replicação da equação para determinação do valor de  $K$ .

Os valores de  $K$  são propostos para uso em modelos de qualidade de água.



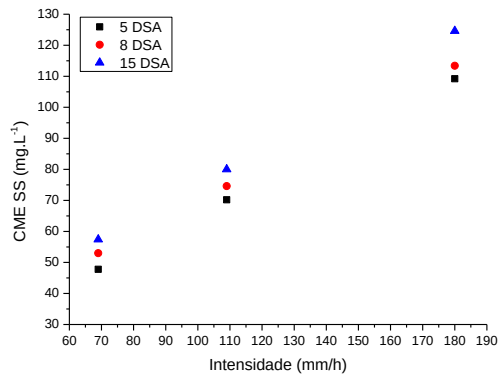
**Tabela 4.6** – Valores estimados para o coeficiente de wash-off (K).

| Parâmetros | <b>I = 69 mm/h</b> |          |          | <b>I = 109 mm/h</b> |          |          | <b>I = 180 mm/h</b> |          |          |
|------------|--------------------|----------|----------|---------------------|----------|----------|---------------------|----------|----------|
|            | 11/06/12           | 19/06/12 | 04/07/12 | 11/06/12            | 19/06/12 | 04/07/12 | 11/06/12            | 19/06/12 | 04/07/12 |
| SS         | 0,65               | 0,52     | 0,46     | 0,47                | 0,42     | 0,38     | 0,50                | 0,48     | 0,48     |
| Cr         | 0,29               | 0,27     | 0,27     | 0,39                | 0,35     | 0,34     | 0,48                | 0,48     | 0,46     |
| Cd         | 0,17               | 0,19     | 0,18     | 0,14                | 0,15     | 0,14     | 0,14                | 0,10     | 0,05     |
| Cu         | 0,42               | 0,40     | 0,40     | 0,46                | 0,40     | 0,37     | 0,45                | 0,47     | 0,51     |
| Pb         | 0,26               | 0,26     | 0,27     | 0,43                | 0,31     | 0,32     | 0,56                | 0,47     | 0,53     |
| Ni         | 0,15               | 0,17     | 0,18     | 0,17                | 0,19     | 0,21     | 0,20                | 0,23     | 0,25     |
| Zn         | 0,29               | 0,29     | 0,29     | 0,38                | 0,42     | 0,49     | 0,64                | 0,62     | 0,52     |
| Mn         | 0,20               | 0,19     | 0,20     | 0,25                | 0,24     | 0,25     | 0,34                | 0,33     | 0,31     |
| Fe         | 0,39               | 0,37     | 0,37     | 0,36                | 0,35     | 0,34     | 0,44                | 0,44     | 0,44     |

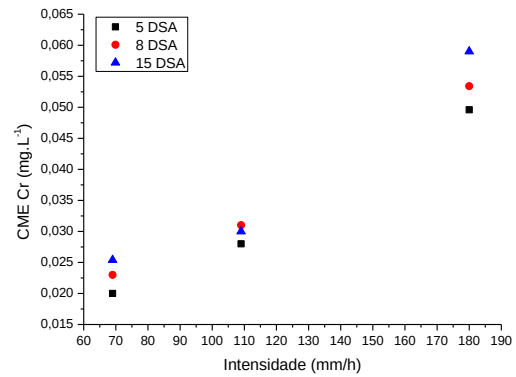
De acordo com a **Tabela 4.6**, os valores dos coeficientes K encontrados para cada intensidade nos diferentes eventos simulados, estão próximos e, portanto, pode-se presumir que não há diferença significativa entre as áreas. A diferença nos valores se dá pelo tipo de poluente e variação da intensidade de precipitação.

#### 4.2.6 Relação entre Intensidade e Wash-off

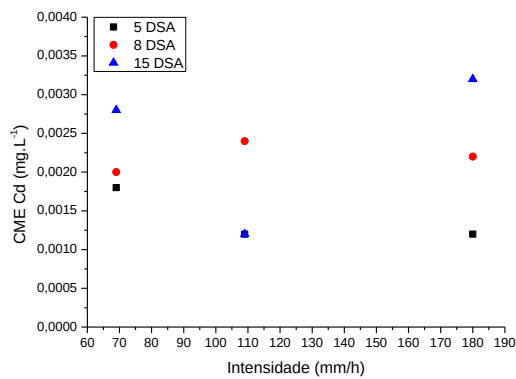
As **Figuras 4.62 a 4.70** ilustram a variação da intensidade de precipitação com os valores das concentrações médias dos eventos para os diferentes parâmetros analisados. Os gráficos são representados pela análise obtida para as três intensidades avaliadas com diferentes dias secos antecedentes ao evento simulado.



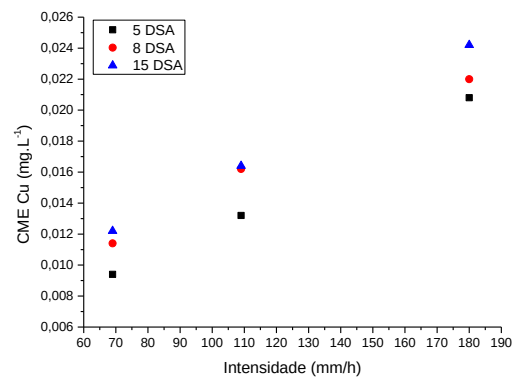
**Figura 4.62** – Relação I x Wash-off de SS.



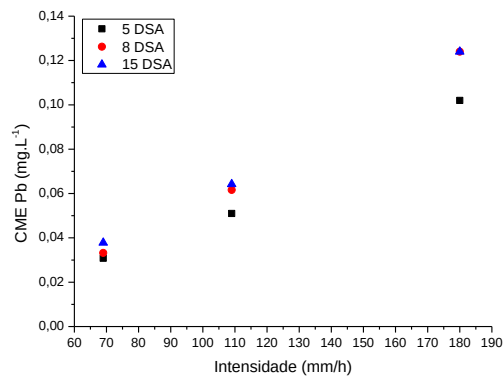
**Figura 4.63** – Relação I x Wash-off de Cr.



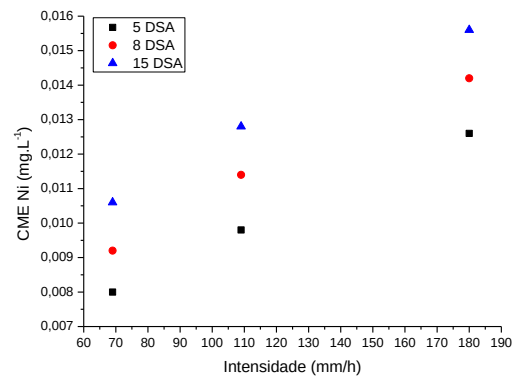
**Figura 4.64** – Relação I x Wash-off de Cd.



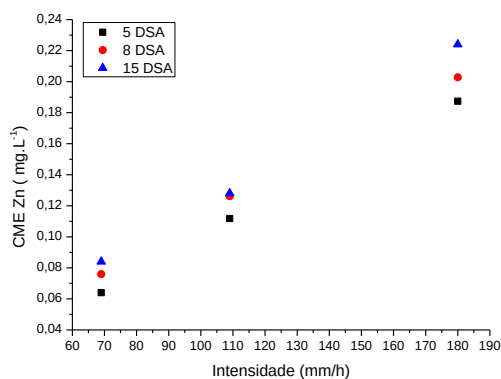
**Figura 4.65** – Relação I x Wash-off de Cu.



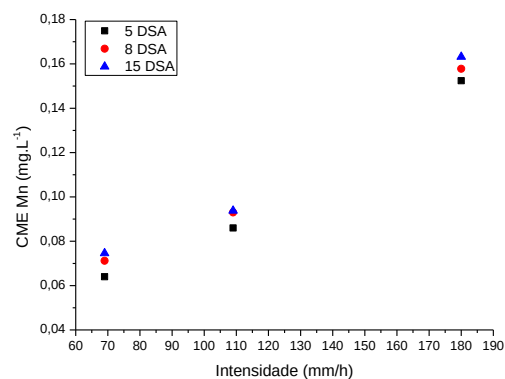
**Figura 4.66** – Relação I x Wash-off de Pb.



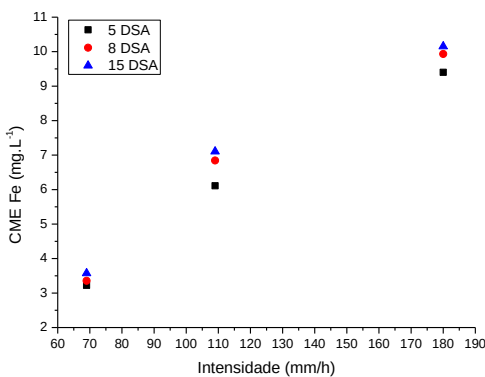
**Figura 4.67** – Relação I x Wash-off de Ni.



**Figura 4.68** – Relação I x Wash-off de Zn.



**Figura 4.69** – Relação I x Wash-off de Mn.



**Figura 4.70** – Relação I x Wash-off de Fe.

Pode-se constatar que grande parte dos poluentes inicialmente disponíveis são submetidos ao processo de wash-off durante o aumento da intensidade de precipitação, visto que há maior desprendimento com maior intensidade de chuva na faixa de 69 – 180 mm/h, e esse processo aumenta, consequentemente, com o aumento da intensidade.

O estudo realizado numa área urbana por Egodawatta *et al.*, (2006) relata resultados semelhante ao encontrado neste estudo, onde o processo de wash-off aumenta com o aumento da intensidade de 60mm/h para 120mm/h, demonstrando que ocorre uma relação direta entre intensidade e wash-off.

A partir dos gráficos apresentados, percebe-se o efeito da intensidade de chuva sobre o processo de wash-off, demonstrando que chuvas com maiores intensidades deslocam mais poluentes.

## CAPÍTULO 5 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O presente trabalho é o primeiro realizado no Estado de Goiás sobre a quantificação de poluentes em águas de drenagem urbana, principalmente metais, na água de escoamento de uma área urbana de Goiânia, obtendo-se valores nunca antes estimados. Os experimentos incluíram períodos intercalados para os eventos de precipitação simulados, variando-se os dias secos antecedentes às coletas e as intensidades de chuva.

Dos resultados obtidos pode-se constatar que a carga do build-up nas áreas avaliadas é, em média, de  $71,8 \text{ g/m}^2$ , e a taxa de acúmulo é, em média,  $8,53 \text{ g/m}^2\text{dia}$ , sendo suas variações dependentes dos dias secos antecedentes, sendo que quanto mais dias secos antecedentes há um maior acúmulo de poluentes.

O melhor ajuste para determinação da equação do build-up foi feito pela equação linear, porém o número de amostras foi ainda pequeno.

Foram encontrados cromo, cádmio, cobre, chumbo, níquel, zinco, manganês e ferro em todas as parcelas experimentais analisadas para todos os eventos simulados nos diferentes períodos.

De um modo geral, verificou-se que os valores dos parâmetros analisados encontraram-se mais elevados nas amostras do último período amostral, onde houve um maior período seco antecedente antes do evento simulado.

A análise de correlação entre os parâmetros apresentou uma associação significativa, direta e acentuada entre grande parte das variáveis avaliadas, principalmente entre os metais, o que pode auxiliar significativamente na determinação dos parâmetros de qualidade da água. Com os dados de regressão obtidos pode-se estimar valores de alguns parâmetros através da medida de outros parâmetros, em estudos futuros.

Foram obtidos os coeficientes de wash-off fornecendo valores de referência para modelagem de BMP's e técnicas de manejo, viabilizando estudos para áreas de estacionamento no município de Goiânia.

Ficou evidenciado o efeito da intensidade de chuva sobre o processo de wash-off, em que chuvas de maiores intensidades deslocam mais poluentes, logo o processo de wash-off aumenta com o aumento da intensidade de precipitação.

A estimativa dos parâmetros relativos às operações de acúmulo e carreamento de poluentes gerou dados para a modelagem da qualidade das águas urbanas, podendo ser utilizados em vários modelos de qualidade de águas pluviais, tal como o USEPA's Stormwater Management Model (SWMM), sendo importante para previsão de impactos de mudanças urbanas, dimensionamento de estruturas e seleção de alternativas de manejo.

Contudo, através dos procedimentos realizados e dos resultados obtidos no presente trabalho, recomenda-se:

- a) pesquisar a viabilidade do uso do simulador na área a ser analisada;
- b) simular outras intensidades de chuva, com diferentes durações, assim como monitorar eventos de chuva naturais;
- c) avaliar um maior número de eventos com diferentes dias secos antecedentes;
- d) verificar o efeito de diferença entre os tipos de pavimento, condições do pavimento e usos do solo sobre o build-up e wash-off;
- e) aplicar dados obtidos nos modelos matemáticos para representação do comportamento da qualidade das águas em ambientes urbanos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRAL, M.C.; ROGER, S.; MONTREJAUD-VIGNOLES, M. ; HERREMANS, L. **Particle size distribution and hydrodynamic characteristics of solid matter carried by runoff from motorways**. Water Environment Research, 1999.

APHA. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, Washington, 1999.

APHA. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, Washington, 2005.

BALL, J.E.; JENKS, R.; AUBOURG, D. **An assessment of the availability of pollutant concentrations on road surfaces**. The Science of the Total Environment, 1998.

BANNERMAN, R.; LEGG, A.; GREB, S. **Quality of Wisconsin Stormwater, 1989-94, U.S.** Geological Survey Water Resources Investigation Report. With the Wisconsin Department of Natural Resources. Madison, WI, 1996.

BÁRBARA, V.F. **Uso do modelo QUAL2E no estudo da qualidade da água e da capacidade de autodepuração do Rio Araguari-AP (Amazônia)**. Dissertação de Mestrado. EEC-UFG, 2006.

BARRAUD, S.; GAUTIER, A.; BARDIN, J.; RIOU, V. **The Impact of Intentional Stormwater Infiltration on Soil and Groundwater**, Water Science and Technology, Vol. 39, Nº 2, Elsevier Science Ltd., Great Britain, 1999.

BERNARDES, R. S; SOARES, S. R. A. **Planejamento de sistemas de drenagem: efeitos na saúde pública e no meio ambiente**. In: Workshop em Drenagem Urbana Sustentável no Brasil. Goiânia, 2003.

BERTRAND-KRAJEWSKI, J.L.; EL-JAWHARI, A.; CHEBBO, G. **Dimensionnement des ouvrages de traitement des rejets urbains de temps de pluie**. Rapport de Recherche Agence de l'Eau Seine Normandie, France, 2000.

BREZONIK, P.L.; STADELMANN, T.H. **Analysis and predictive models of storm water runoff volumes, loads, and pollutant concentrations from watersheds in the Twin Cities metropolitan area, Minnesota, USA**. Water Research, 2002.

BRIS, F.J.; GARNAUD, S.; APPERY, N.; GONZALEZ, A.; MOUCHEL, J.M.; CHEBBO, G.; THEVENOT, D. R. **A street deposit sampling method for metal and hydrocarbon contamination assessment**. The Science of the Total Environment, 1999.

BRITES, A.P.Z.; GASTALDINI, M.C.C. **Avaliação da Carga Difusa da Drenagem Pluvial Urbana na Bacia hidrográfica Cancela**. In: 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2005, Campo Grande - MS. Anais ABES, 2005.

BUBB, J.M.; LESTER, J.N. **Anthropogenic heavy metal inputs to lowland river systems, a case study**. Water, Air and Soil Pollution, 1993.

BURTON, G.A.; PITT, R. **Stormwater effects handbook: a toolbox for watershed managers, scientists, and engineers**. USA, 2001.

BUTLER, D. e CLARK, P. **Sediment management in urban drainage catchments**. Construction Research and Information Association, CIRIA Report 134. London, 1995.

CAMPOS, L.C.; PARKINSON, J.; MILOGRANA, J.; CAMPOS, R. **Drenagem urbana sustentável no Brasil**. Workshop – Goiânia, 2003.

CANHOLI, A.P. **Drenagem urbana e controle de enchentes**. São Paulo: Oficina de textos, 2005.

CENTER FOR WATERSHED PROTECTION, **National Pollutant Removal Performance Database for Stormwater Treatment Practices 2nd Edition**, Center for Watershed Protection, Ellicott City, MD, 2000.

CHOCAT, B. (coordenador). **Encyclopédie de l'hydrologie urbaine**. Paris, 1997.

CHUI, P. C. **Characteristics of stormwater quality from two urban watersheds in Singapore**. Environmental Monitoring and Assessment, 1997.

CORRENTINO, M. **As inundações estão chegando a Goiânia**. In: SENGE. Sindicato dos engenheiros, 2007.

COSTA, A. R. e PRADO, L. A. **Espacialização de chuvas intensas para o estado de Goiás e o sul de Tocantins**. Revista de Engenharia Agrícola, v.23, 2003.

COSTA, A. R.; MENEZES FILHO, F. C. M.; ALVES, F. A. O; SIQUEIRA, E. Q. **Curso Básico de Hidrologia Urbana**. Brasília: Rede Nacional de Capacitação e Extensão Tecnológica em Saneamento Ambiental – ReCESA, 2007.

DAVIS, A.P.; SHOKOUHIAN, M.; NI, S. **Loading estimates of lead, copper, cadmium, and zinc in urban runoff from specific sources**. Chemosphere, 2001.

DELETIC, A. **The first flush load of urban surface runoff**. Water Resource, vol.32, n.8, 1998.

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



- DELETIC, A; ORR, D. W. **Pollution buildup on road surfaces**. Journal of Environmental Engineering, vol.131 n.1, 2005.
- DONG, A.; CHESTERS, G.; SIMSIMAN, G.V. **Metal composition of soil, sediments and urban dust and dirt samples from the Menomonee River watershed, Wisconsin, USA**. Water, Air and Soil Pollution, 1984.
- DOTTO, C.B.S. **Acumulação e balanço de sedimentos em superfícies asfálticas em área urbana de Santa Maria – RS**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – UFSM, 2006.
- DRAPPER, D.; TOMLINSON, R.; WILLIAMS, P. **Pollutant concentrations in road runoff: Southeast Queensland case study**. Journal of Environmental Engineering, 2000.
- DROPPO, L.G.; IRVINE, K.N.; MURPHY, T.P.; JASKOT, C. **Fractionated metals in street dust of a mixed land use sewershed, Hamilton, Ontario**. In: Hydrology in a Changing Environment, British Hydrological Society, 1998.
- DUNCAN, H.P. **A review of urban stormwater quality processes**. Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology. Report n°95/9, 1995.
- DUNCAN, H. **Urban stormwater pollutant concentration and loads**. In: Draft Australian Runoff Quality Guidelines. Australia, 2003.
- EGODAWATTA, P. e GOONETILLEKE, A. **Characteristics of pollution build-up on residential road surfaces**. Paper presented at the 7th International conference on hydrosience and engineering (ICHE 2006), Philadelphia, USA, 2006.
- EGODAWATTA, P.; THOMAS, E.; GOONETILLEKE, A. **Mathematical interpretation of pollutant wash-off from urban road surfaces using simulated rainfall**. Water Research, 2007.
- ESTEBE, A.; BOUDRIES, H.; MOUCHEL, J.M.; THEVENOT, D.R. **Urban runoff impacts on particulate metal and hydrocarbon concentrations in river Seine: suspended solid and sediment transport**. Water Science and Technology, 1997.
- GASTALDINI, M.C.C.; BONUMA, N.B.; PAIVA, J.B.D. **Análise da carga difusa de poluição gerada por atividades de mineração**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Vol 13 n.3 Jul/Set, 2008.
- GREENWAY, M.; LE MUTH, N.E.; JENKINS, G. **Monitoring spatial and temporal changes in stormwater quality through a series of treatment trains. A case study - Golden Pond, Brisbane, Australia**. Global Solutions for Urban Drainage, 2002.
- GUEGUEN, C.; DOMINIK, J. **Partitioning of trace metals between particulate, colloidal and truly dissolved fractions in a polluted river: the Upper Vistula River (Poland)**. Applied Geochemistry, 2003.

HERNGREN, L. **Build-up and wash-off process kinetics of PAHs and heavy metals on paved surfaces using simulated rainfall**. Tese de Doutorado. Faculty of built environment and engineering, 2005.

IDE, C.N. **Qualidade da drenagem pluvial urbana**. Dissertação de Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento - IPH –UFRGS, Porto Alegre, 1984.

JAMES, W.; HUBER, W.C.; DICKINSON, R.E.; JAMES, R.C. **Water systems models Hydrology: a guide to the rain, temperature and runoff modules of the USEPA SWMM4**. CHI, Guelph, Ontario, Canada, 1999.

LEE, J.H.; BANG, K.W.; KETCHUM, L.H.; CHOE, J.S.; YU, M.J. **First flush analysis of urban storm runoff**. The Science of the Total Environment, 2002.

KIM, G.; YUR, J.; KIM, J. **Diffuse pollution loading from urban stormwater runoff in Daejeon city, Korea**. Journal of Environmental Management, 2006.

LEE, J.H.; BANG, K.W. **Characterization of urban stormwater runoff**. Water Research, 2000.

LEE, J. H.; BANG, K.W.; KETCHUM, L.H.; CHOE J. S.; YU, M. J. **First flush analysis of urban storm runoff**. The Science of the Total Environment, 2001.

LEGRET, M.; PAGOTTO, C. **Evaluation of pollutant loadings in the runoff waters from a major rural highway**. The Science of the Total Environment, 1999.

LIEBENS, J. **Heavy metal contamination of sediments in stormwater management systems: the effect of land use, particle size, and age**. Environmental Geology, 2001.

LIMA, E.B.N. **Modelação Integrada para Gestão da Qualidade da Água na Bacia do Rio Cuiabá**. Tese de Doutorado. Rio de Janeiro, RJ: UFRJ, 2001.

MANOLI, E. e SAMARA, C. **Polycyclic aromatic hydrocarbons in natural waters: sources, occurrence and analysis**. Trends in Analytical Chemistry, 1999.

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

MENEZES FILHO, F.C.M. **Sistematização para projeto de galeria de águas pluviais**. Dissertação de Mestrado. Goiânia,GO: EEC-UFG, 2007.

MENEZES, F.L. **Avaliação da qualidade de águas de drenagem urbana correlacionada aos poluentes originados pelo tráfego de veículos automotores: estudo de caso do Túnel Rebouças na bacia contribuinte da Lagoa Rodrigo de Freitas, RJ**. Dissertação de Mestrado. UERJ, 2004.

- MILLAR, R.G. **Analytical determination of pollutant wash-off parameters.** Journal of Environmental Engineering, 1999.
- MORRISON, G.M.; REVITT, D.M.; ELLIS, J.B. **Variations of dissolved and suspended heavy metals through an urban hydrograph.** Environmental Technology Letters, 1984.
- MOYSÉS, A. **Goiânia: Metrópole não planejada.** Goiânia, GO: Ed. da UCG, 2004.
- NOVOTNY, V. **Unit pollutant loads: their fit in abatement strategies.** Water Environment & Technology, vol.4, n.1. Janeiro, 1992.
- OLIVEIRA, H.A.R. **Qualidade da drenagem pluvial rural: Rio Taquarizinho – MS.** Dissertação de Mestrado em Tecnologias Ambientais – UFMS, 2007.
- PECHACEK, L. D. **Urban runoff based on land use and particle size.** ASCE National Conference on Hydraulic Engineering, Buffalo, USA, 1994.
- PITT, R.; PARMER, K.; CLARK, S.; FIELD, R. **Potential Groundwater Contamination from Intentional and Nonintentional Stormwater Infiltration, 1993 Research Project,** Cooperative Agreement, United States Environmental Protection Agency, Cincinnati, OH, 1994.
- PITT, R.; FIELD, R.; LALOR, M.; BROWN, M. **Urban stormwater toxic pollutants: assessment, sources and treatability.** Water Environ. May/June, 1995.
- PITT, R.; FIELD, R.; LALOR, M.; BROWN, M.; and MINERVINI, W.P. **Urban stormwater toxic pollutants: Assessment, sources and treatability.** Water Environment Research, 1996.
- PORTO, M.F.A. **Aspectos Qualitativos do Escoamento Superficial em Áreas Urbanas.** In: TUCCI, C.E.M.; PORTO, R.L.L.; BARROS, M.T. Drenagem Urbana. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS/ABRH, 1995.
- PORTO, M. F. A. **Aspectos qualitativos do escoamento superficial em áreas urbanas.** In: Drenagem Urbana. Porto Alegre: Ed.Universidade/UFRGS/ABRH, 2001.
- QU, W.; KELLERMAN, P. **Heavy metal contents in the Delft canal sediments and suspended solids of the River Rhine: multivariate analysis for source tracing.** Chemosphere, 2001.
- ROBERTSON, D.J.; TAYLOR, K.G.; HOON, S.R. **Geochemical and mineral magnetic characterisation of urban sediment particulates, Manchester, UK.** Applied Geochemistry, 2003.
- RODRIGUES, A.C.; COELHO, P.S.; SILVA, S.P.; FONSECA, M.R.; DIOGO, P.A. **Modelação da Qualidade da Água na Bacia Hidrográfica do Rio Ave.** In: 6º Congresso da Água de Portugal. Anais. Alfândega, Portugal: APRH. 2002.
- ROGEE, W.F.; HILDERMANN, L.M.; MAZUREK, M.A.; CASS, G.R. **Sources of fine organic aerosol. Road dust, tire debris, and organometallic brake lining dust: roads as sources and sinks.** Environmental Science and Technology, 1993.

SANSALONE, J.J.; BUCHBERGER, S.G. **Characterization of solid and metal element distributions in urban highway stormwater**. Water Science and Technology, 1997.

SANTOS, K.R.; ROMÃO, P.A. **Inundações em bacias urbanas em Goiânia: intervenção humana e a intensificação de fenômenos naturais**. In: XIII Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada. UFV, 2009.

SARTOR, J.D.; BOYD, G.B.; AGARDY, F.J. **Water pollution aspects of street surface contaminants (EPA-R2-72/081)**. US Environmental Protection Agency, Washington, DC, 1974.

SEMA/SP - SECRETARIA DE ESTADO DO MEIO AMBIENTE. **A Qualidade das Águas**. Série Manuais Ambientais. São Paulo, SP: CETESB, 2000.

SHAHEEN, D.G. **Contribution of urban roadway usage to water pollution**. USEPA Report, 1975.

SHINYA, M.; TSUCHINAGA, T.; KITANO, M.; YAMADA, Y.; ISHIKAWA, M. **Characterization of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons in urban highway runoff**. Water Science and Technology, 2000.

SILVA, J.B.; IDE, C.N.; RIBEIRO, M.L.; TEODORO, A.; STEFFEN, J.L.; CYBIS, L.F.A. **Urban runoff quality from the Cabaça stream basin**. 12<sup>nd</sup> International Conference on Urban Drainage, Porto Alegre/Brazil, September, 2011.

SMITH, E. **Pollutant concentrations of stormwater and captured sediment in flood control sumps draining an urban watershed**. Water Research, 2001.

SOUSA JUNIOR, S. F. **Desenvolvimento e avaliação de um simulador de chuva para estudos hidrológicos urbanos**. Dissertação de Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente – EEC – UFG, 2011.

SUTHERLAND, R.A.; JELEN, S.L.; MINTON, G. **High efficiency sweeping as an alternative to the use of wet vaults for stormwater treatment**. Advances in Modelling the Management of Stormwater Impacts, 1998.

TAI, Y.L. **Physical and chemical characterisation of street dust and dirt from urban areas**. Master of Science Thesis. Pennsylvania State University, 1991.

THOMSON, N. R.; MCBEAN, E. A.; SNODGRASS, W.; MONSTRENKO, I. B. **Highway stormwater runoff quality: development of surrogate parameter relationships**. Water, Air, and Soil Pollution, n° 94, 1997.

TUCCI, C.E.M.; COLLISCHONN, W. **Drenagem urbana e controle de erosão**. In: VI Simpósio Nacional de Controle da Erosão. Presidente Prudente-SP, 1998.

TUCCI, C.E.M. **Drenagem urbana e controle de inundações**. Ciência da Terra e Meio Ambiente. São Leopoldo, 1999.

TUCCI, C.E.M.; VILLANUEVA, A.; CRUZ, M.A.S. **Banco de eventos de cheias de bacias urbanas brasileiras**. In: Avaliação e controle da drenagem urbana. Porto Alegre: Ed.Universidade/UFRGS,2000.

TUCCI, C.E.M.; MARQUES, D.M.L.M. **Avaliação e controle da drenagem urbana**. Porto Alegre: Ed.Universidade/UFRGS,2000.

TUCCI, C.E.M. **Drenagem urbana**. In: Revista Ciência e Cultura. Vol.55; Oct/Dec, 2003.

TUCCI, C.E.M. **Águas urbanas**. In: Revista Estudos Avançados. Vol.22; Nº63, 2008.

UJEVIC, I.; ODZAK, N.; BARIC, A. **Trace metal accumulation in different grain size fractions of the sediments from a semi-enclosed bay heavily contaminated by urban and industrial wastewaters**. Water Research, 2000.

VAZE, J.; CHIEW, F.H.S.; SURYADI, L.; KHANAL, K. **Pollutant accumulation on an urban road surface**. In: Urban storm water pollution, Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology, Melbourne, Victoria, 1997.

VAZE, J.; CHIEW, F.H.S. **Experimental study on pollutant accumulation on an urban road surface**. Urban Water, 2002.

VERMETTE, S.J.; IRVINE, K.N.; DRAKE, J.J. **Temporal variability of the elemental composition in urban street dust**. Environmental Monitoring and Assessment, 1991.

WANIELISTA, M. P.; YOUSEF, Y. A. **Stormwater Management**. New York: John Wiley, 1993.

WARREN, N.; ALLAN, I. J.; CARTER, J. E.; HOUSE, W. A.; PARKER, A. **Pesticides and other micro-organic contaminants in freshwater sedimentary environments - a review**. Applied Geochemistry, 2003.

ZOPPOU, C. **Review of urban stormwater models**. Environmental Modelling and Software, 2001.

YUAN, Y.; HALL, K.; OLDHAM, C. **A preliminary model for predicting heavy metal contaminant loading from an urban catchment**. The Science of the Total Environment, 2001.

YUN, S.T.; CHOI, B.Y.; LEE, P.K. **Distribution of heavy metals (Cr, Cu, Zn, Pb, Cd, As) in roadside sediments, Seoul Metropolitan City, Korea**. Environmental Technology, 2000.