

---

**Caracterização do carreamento de poluentes de superfícies asfálticas urbanas utilizando chuva simulada****Wash-off characterization pollutant from asphaltic surfaces using rainfall simulator****Emanoelle Pereira da Silva<sup>1</sup> e Eduardo Queija de Siqueira<sup>2</sup>**<sup>1,2</sup> Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO. Brasil

manups3@gmail.com; eduqs@yahoo.com

Recebido: 07/01/14 - Revisado: 01/03/15 - Aceito: 09/06/15

---

**RESUMO**

O carreamento de poluentes das superfícies asfálticas pela água da chuva é uma das principais fontes de degradação da qualidade da água dos corpos receptores no ambiente urbano. No entanto, pouco se sabe sobre o potencial desses poluentes de serem transportados pela água da chuva. Nesta perspectiva, este trabalho visa caracterizar a água de escoamento e quantificar o carreamento de poluentes de superfícies asfálticas, buscando relacionar a massa carregada com a intensidade da chuva e o fluxo de veículos. Para tal, foram selecionadas três ruas com diferentes fluxos de veículos na cidade de Goiânia, nas quais foram simulados dois eventos de chuva, sendo um de alta e outro de baixa intensidade (115 e 25 mm/h), ambos com duração de 15 minutos, sob uma superfície asfáltica de 3m<sup>2</sup>. As amostras de água foram coletadas a cada 3 minutos por meio de um sistema coletor (moldura, bandeja coletora e sistema de aspiração), e foram analisadas quanto às concentrações de SST, STD, DQO, condutividade, Cu, Cr, Pb, Cd, Zn, Fe e Mn. A precipitação e vazão de escoamento no tempo foram mensuradas pelo método volumétrico. Os resultados mostram que todos os parâmetros analisados, exceto o cromo, foram detectados na água escoada das três áreas de estudo, sendo que as maiores massas carregadas seguem em geral a sequência decrescente Fe > Mn ≈ Zn > Pb ≈ Cu > Cd. Da influência da chuva no carreamento de poluentes, observou-se que quanto maior a intensidade maior a massa carregada de sólidos e metais. Entretanto não se observou uma relação clara entre o fluxo de veículos e a massa carregada de metais.

**Palavras Chave:** Qualidade da água. Águas urbanas. Chuva simulada. Escoamento de águas pluviais

**ABSTRACT**

The wash-off of pollutants from asphaltic surfaces by runoff is one of the main sources of water quality degradation in urban water bodies. However, little is known about the potential of these pollutants to be transported by runoff. In this regard, this research aims to characterize the runoff water and quantifying the mass of washed-off pollutants from asphaltic surfaces relating it with rainfall intensity and traffic load. Therefore, three streets with different traffic loads have been selected in the city of Goiânia, Goiás, Brazil. Over an asphaltic surface of 3 m<sup>2</sup> two 15 minutes duration rainfall events were simulated (115 and 25mm/h) considered of high and low intensity. Water samples were collected every 3 minutes interval by means of a collecting system (frame, collecting tray and vacuuming system) and analyzed according to its contents of TSS, TDS, COD, conductivity, Cu, Cr, Pb, Cd, Zn, Fe and Mn. Rainfall and flowrate were measured by the volumetric method. Results show that all the analyzed parameters, except for Cr, have been detected in the runoff of all three studied areas. Generally, greater washed-off masses of Fe > Mn ≈ Zn > Pb ≈ Cu > Cd were found, listed in decreasing order of magnitude. Regards to the influence of rainfall, it has been noticed that the greater the rainfall intensity the greater the washed-off mass of solids and metals. However, no clear relationship has been found between the traffic load and the washed-off mass of metals.

**Keywords:** Water quality. Urban waters. Rainfall simulation. Stormwater runoff

## INTRODUÇÃO

Os sedimentos depositados nas superfícies asfálticas urbanas provocam impacto na qualidade das águas pluviais e consequentemente nos corpos receptores. Nesta perspectiva, uma parcela da poluição dos cursos de água tem origem no escoamento superficial urbano, o qual transporta uma carga poluidora característica do tipo de uso e ocupação do solo da área de drenagem. Em alguns casos, este escoamento superficial pode apresentar concentrações superiores às de um efluente sanitário em termos de metais pesados, sólidos, nutrientes e outros poluentes (MIGUNTANNA, 2009; PITT; BURTON, 2001; SARTOR; BOYD, 1972).

De acordo com Tucci (2003), estes poluentes podem advir da deposição atmosférica, da erosão do solo, do desgaste e lavagem das superfícies, do acúmulo, deposição e transporte de lixo urbano, de atividades industriais e do tráfego de veículos. Destas principais fontes de poluição, Egodawatta (2007) e Zhao, Li e Wang. (2011), comentam que o fluxo de veículos nas áreas urbanas é um fator crítico que afeta a concentração dos poluentes depositados na superfície asfáltica, sobretudo de metais pesados e outros compostos tóxicos. Estes poluentes são lixiviados pela chuva e incorporados ao escoamento superficial, o qual segundo Lee et al. (2002), é uma das principais fontes de degradação dos corpos de água. No entanto, os fatores que determinam a concentração de metais no escoamento superficial são complexos (DAVIS; SHOKOUHIAN, 2001; HERNGREN; GOONETILLEKE; AYOKO, 2005).

Segundo a EPA (1999), os metais mais recorrentes no escoamento superficial urbano são o chumbo, zinco e cobre, os quais, em seus estudos, foram detectados com uma frequência de 75%. Esses metais são complexados, sobretudo às partículas mais finas dos sedimentos, as quais são mais viáveis de serem transportadas por longas distâncias pelas redes de drenagem e se depositam no leito dos rios (HERNGREN, 2005).

O carreamento de poluentes (*Wash-off*) é definido por Egodawatta, Thomas e Goonetilleke (2009), como o processo pelo qual o sedimento acumulado na superfície é lixiviado ou carreado pela água da chuva e é incorporado no escoamento superficial. Desta forma, durante um evento de precipitação a superfície molhada atua dissolvendo e solubilizando os poluentes disponíveis, os quais são transportados pelo sistema de drenagem e chegam aos corpos de água.

Para Miguntanna (2009), o carreamento dos poluentes da superfície depende de características físicas e químicas do processo, como da intensidade e duração da chuva, da velocidade do escoamento, do tamanho das partículas e da qualidade da água precipitada. Tiefenthaler et al. (2001), por exemplo, comentam que a maior intensidade da chuva tende a elevar a carga total de poluentes carreada da superfície, e que a concentração dos poluentes nos primeiros minutos de chuva é maior, evidenciando o fenômeno denominado de "*First-Flush*". Kim et al. (2007) confirmam que a maior carga de lavagem ocorre nos primeiros minutos da precipitação, período em que são mais elevadas as concentrações de metais, sólidos e nutrientes no escoamento superficial. Ainda, ressalta-se que a massa transportada é também afetada pela extensão da área permeável e pelo número de dias

secos antecedentes ao evento de precipitação (LEE et al., 2002).

Neste contexto, percebe-se que a poluição das águas de drenagem urbanas decorre de vários mecanismos físicos e químicos difíceis de serem mensurados. Trata-se de uma fonte difusa de poluição, ou seja, em que não há um ponto estacionário de lançamento. A intensidade do transporte da massa dos poluentes depende de características naturais dos eventos de chuva e do escoamento superficial, bem como da quantidade e qualidade dos sedimentos depositados nas superfícies. Assim, vários estudos tem sido desenvolvidos (EGODAWATTA; THOMAS; GOONETILLEKE, 2009; KIM et al., 2007; LI et al., 2007), com o intuito de caracterizar a água drenada e de propor medidas que minimizem os impactos desta fonte de poluição sob os corpos de água em áreas urbanas. Estudos desta natureza fornecem dados para o planejamento e implementação de medidas compensatórias de drenagem, de preservação dos ecossistemas aquáticos e de subsistência humana.

Assim, este estudo tem por objetivo caracterizar a água de escoamento superficial e quantificar o carreamento de poluentes de sólidos, matéria orgânica e metais pesados presentes no escoamento de três parcelas experimentais asfálticas, no município de Goiânia, Goiás, buscando relacionar a massa carreada de poluentes com a intensidade da chuva e o fluxo de veículos.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Área de Estudo

A pesquisa foi desenvolvida na cidade de Goiânia, município mais populoso do Estado de Goiás, localizado no Centro-Oeste do Brasil. A cidade conta com população estimada de 1.302.001 habitantes (IBGE, 2010). O principal bioma é o Cerrado com solo arenoso e ácido. O clima é caracterizado por duas estações distintas com um período chuvoso e outro seco, em que a temperatura varia de 18 a 32°C e as médias de precipitação anual estão entre 1400 e 1500 mm.

Como objeto de estudo foram selecionadas três ruas em Goiânia, escolhidas pela diferença no fluxo de veículos, o qual foi quantificado pelo Volume Médio Diário (VMD) do tráfego das vias com uso da Ficha de Contagem Volumétrica I, do Manual de Estudos de Tráfego, aplicada em dois períodos de 4 horas nas ruas (BRASIL, 2006). A partir desta análise, as vias selecionadas para estudo, Avenida Universitária, Rua 240 e Viela 1, foram classificadas de alto, médio e baixo fluxo de veículos, respectivamente. A declividade transversal das vias foi medida pelo programa X-Clinometer em três pontos para cada via, e foi calculada a média aritmética. A caracterização das áreas segue na tabela 1.

### Simulador de chuvas

A chuva natural tem características variáveis como a intensidade, a duração, o tamanho e a energia cinética das gotas. Tais características são difíceis de serem controladas ou replicadas, e este fato restringe a utilização de dados de chuvas naturais para desenvolver conceitos e relações entre a precipi-

Tabela 1 - Características físicas da área de estudo

Local	Característica da via	Dias de Limpeza Urbana	Declividade média da rua (%)	VMDd <sub>(t,q/fev.)*</sub> (veículos/dia)
Vieira 1	- Uso residencial e industrial; - Superfície asfáltica desgastada; - Presença de algumas árvores; - Área impermeável (calçadas asfaltadas);	Ocasional as segundas ou sextas-feiras	2,7	150
Rua 240	- Uso residencial e comercial; - Superfície asfáltica conservada; - Muitas árvores; - Área permeável nos canteiros;	Sextas-feiras	3,7	1.500
Av. Universitária	- Uso comercial e residencial; - Superfície em ótima condição; - Presença de plantas ornamentais; - Área permeável nos canteiros;	Terças e Quintas-feiras	2,5	10.000

\*<sub>(t,q/fev)</sub> contagem na terça (26/02/2013) e quarta (27/02/2013)

tação e o carreamento (HERNGREN, 2005). Por isso, o uso da chuva simulada tem se tornado frequente em pesquisas de avaliação da qualidade da água, pois permite um maior controle de fatores físicos interferentes (EGODAWATTA; GOONE-TILLEKE, 2006).

Neste estudo, o simulador utilizado foi desenvolvido e construído por Sousa Júnior (2011), o qual é capaz de reproduzir intensidades de chuva para cidade de Goiânia com períodos de retorno de até 10 anos e durações de 10 a 60 minutos. As chuvas produzidas no estudo, apresentaram uniformidade de distribuição satisfatória sob uma área de 3 m<sup>2</sup>, com Coeficiente de Uniformidade de Christiansen (CUC) entre 68,6 e 90,3% em condições de campo sem proteção contra efeitos do vento. Em condições de pressão de 80 kPa, utilizada neste estudo, as gotas produzidas pelo simulador apresentaram um diâmetro médio ( $D_{50}$ ) no intervalo de 2,0 a 2,5 mm, que segundo Miguntanna (2009), é o diâmetro das gotas de chuvas naturais. O simulador de chuvas utilizado produz eventos cuja energia cinética da gota é de 22,53 J/mm/m<sup>2</sup>, o que representa 90,12% da energia cinética da chuva natural.

O simulador de chuvas é composto por uma tubulação

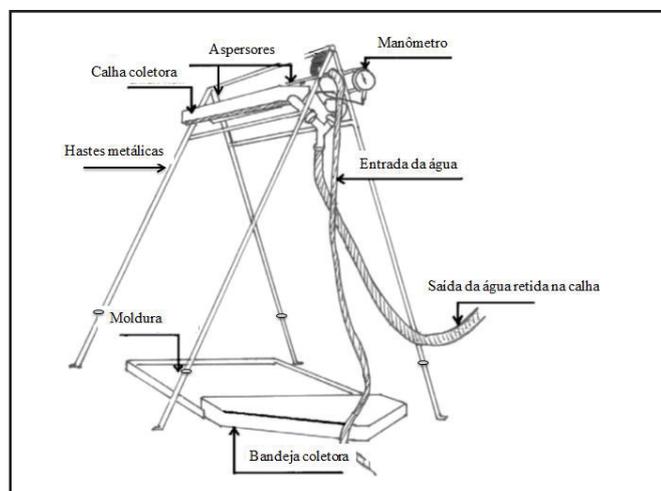


Figura 1 - Desenho esquemático da estrutura do simulador de chuvas e estrutura coletora

de água, duas calhas que coletam o excesso de água que não cai sob a parcela de 3,0 m<sup>2</sup>, oito hastes metálicas que elevam o simulador a uma altura de 3,2 m do solo, e duas válvulas de aspersão, modelo Full Jet HHSS40 da Spraying System, que são controladas por um computador físico, Arduino Duemilino. O modelo esquemático do simulador é ilustrado na figura 1, a qual também ilustra a estrutura coletora do escoamento superficial.

### Coleta do carreamento de poluentes

Para verificar a relação entre a intensidade da chuva e o carreamento de poluentes, duas intensidades foram adotadas no estudo, a de 25 e 115 mm/h. A chuva intensa foi determinada pela curva I-D-F (intensidade-duração-frequência) de Goiânia com o período de retorno de 3 anos e duração de 15 minutos. A chuva de baixa intensidade foi obtida a partir de uma avaliação dos eventos com duração de 10 a 15 minutos registrados na Estação Pluviométrica da Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás no período de 2011/2012. A duração da simulação foi fixada em 15 minutos para as duas intensidades para limitar as variáveis do estudo e viabilizar a execução da pesquisa em campo.

Os experimentos foram conduzidos em duas campanhas de amostragem nos meses de agosto e setembro de 2013 (período de seca). Cada campanha compreende a simulação de três eventos de chuva em uma mesma parcela experimental, sendo uma para cada intensidade. Assim, nas duas campanhas foram simulados eventos 12 eventos de chuva em cada rua, sendo 6 para cada intensidade. Ressalta-se que as áreas experimentais foram distintas em cada campanha para que houvesse réplicas.

Para delimitar a área experimental foi utilizada uma moldura de alumínio de dimensões (2,0 x 1,5 m) com altura de 5 cm, a qual foi envolta por uma manta asfáltica para permitir aderência no asfalto e minimizar as perdas do escoamento. Também foi utilizada massa para calafetar nos cantos da estrutura para minimizar os vazamentos. A moldura tem um lado aberto, no qual foi acoplada uma bandeja coletora, a qual foi construída em chapa galvanizada de 1,23 mm e foi montada no sentido da declividade da rua, conforme apresentado na figura 2-A. Já na

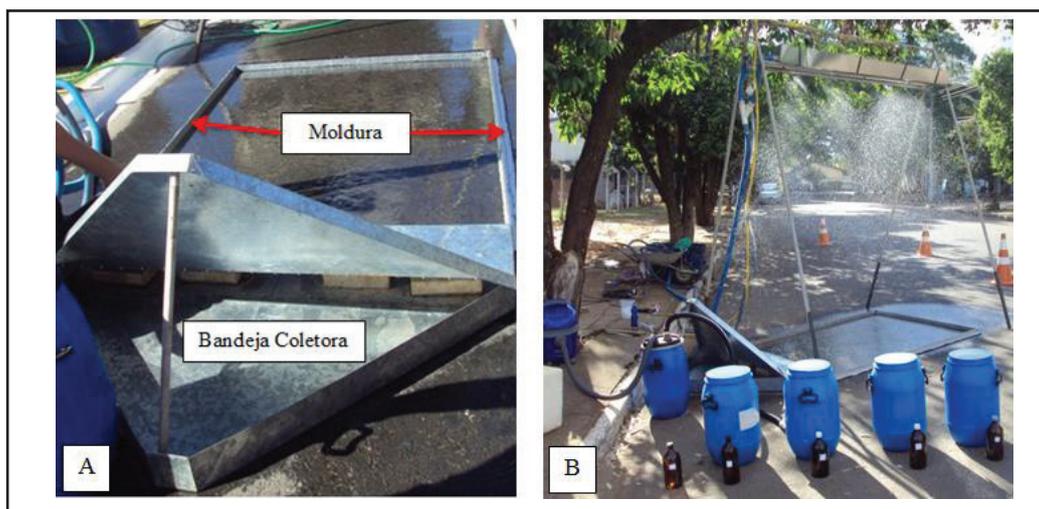


Figura 2 - (A) Estrutura coletora das amostras de escoamento superficial e (B) Simulação do evento de chuva na parcela experimental e coleta do escoamento superficial

figura 2-B é ilustrada uma simulação de evento de chuva na área experimental com o uso do simulador de chuvas e da estrutura coletora. Esta mesma técnica de coleta, a saber, foi utilizada por Egodawatta (2007), Herngren (2005) e Miguntanna (2009).

A água precipitada que então escoava para a bandeja foi simultaneamente coletada com o auxílio de um aspirador de pó e água, modelo Flex S com potência de 1400 W, adaptado a uma bombona de polietileno de 25 L. Para adaptação, dois furos foram feitos na tampa da bombona: em um furo foi colocada a mangueira que sai do aspirador, e no outro, com o auxílio de um adaptador tipo flange, foi acoplada outra mangueira, esta que sai da bombona e coleta a água na bandeja. Também foram feitos quatro furos de 1 cm de diâmetro para saída de ar. A água escoada foi coletada a cada 3 minutos com a troca das bombonas e os volumes contabilizados por volumetria.

Antes da simulação dos eventos nas três áreas experimentais para analisar a qualidade da água do escoamento, três eventos de chuva, para cada intensidade, foram simulados em superfícies asfálticas para avaliar a eficiência do sistema coletor (moldura, bandeja e sistema de aspiração), quanto às perdas por vazamentos em relação ao volume real precipitado. A vazão foi medida pelo método volumétrico, com medições a cada 3 minutos do volume escoado armazenado nas bombonas.

Os resultados mostraram que o simulador foi capaz de produzir as chuvas programadas com um desvio padrão de 8,7 e 0,6 mm/h, respectivamente para as intensidades de 115 e 25

mm/h, e que o sistema coletor obteve eficiências acima de 93% para a coleta dos volumes precipitados nas chuvas simuladas.

### Procedimentos analíticos e cálculos

As amostras coletadas nas bombonas foram homogeneizadas, e então retiradas alíquotas de 1 litro, as quais foram acondicionadas em frascos âmbar e encaminhadas para laboratório. As amostras foram analisadas quanto aos parâmetros de sólidos suspensos totais (SST), sólidos totais dissolvidos (STD), condutividade elétrica (CE), Demanda Química de Oxigênio (DQO) e concentração total de metais, conforme os métodos apresentados na tabela 2. Além das amostras, foram também analisadas a água utilizada nos procedimentos analíticos e nas simulações.

Para análise dos metais, sete elementos foram selecionados por apresentarem características tóxicas aos ecossistemas aquáticos e por serem potencialmente encontrados em águas do escoamento superficial, a saber, o cádmio, chumbo, cromo, cobre, zinco, ferro e manganês como observado por Deletic e Orr (2005), Gunawardana et al. (2012) e Herngren (2005). Os metais foram analisados por Espectrofotometria de Absorção Atômica por chama, um método sensível para determinar mais de sessenta metais em soluções, apresentando limites de detecção na faixa de 0,001 a 0,020 ppm na atomização por chama (SKOOG; HOLLER; TIMOTHY, 2002).

Tabela 2 - Parâmetros analíticos

Parâmetro	Equipamento/ Método	Comentário
Condutividade elétrica (CE)	Condutivímetro/Potenciométrico 2025b (APHA, 1995).	Aferição com padrão de condutividade;
Sólidos totais dissolvidos(STD)	Condutivímetro/ Potenciométrico	Medida indireta;
Sólidos suspensos totais(SST)	Espectrofotômetro DR 5000/ Espectrofotométrico	
Demanda Química de Oxigênio(DQO)	Espectrofotômetro DR 5000/ digestão em refluxo fechado(APHA, 1995).	Uso da solução de $K_2Cr_2O_7/HgSO_4$ e $H_2SO_4/Ag_2SO_4$ a $150^\circ C$ ;
Metais	Espectrofotômetro de absorção atômica por chama/3030E (APHA, 1995).	Digestão com $HNO_3$ .

Para confecção dos gráficos e tratamento dos dados foram utilizados os programas estatísticos Origin Pro na versão 8 e o Microsoft Excel versão 2010. Para calcular a massa carreada durante os eventos de precipitação a Equação 1 foi aplicada. A massa total carreada no evento de duração de 15 minutos é o somatório das massas obtidas nos 5 intervalos de tempo de 3 minutos.

$$m = \sum_{i=1}^n Q_i \times C_i \times \Delta t \quad (1)$$

onde:  $m$  é massa (mg),  $Q_i$  a vazão no intervalo de tempo  $i$  (L/min),  $C_i$  a concentração no intervalo de tempo (mg/L),  $\Delta t$  o intervalo de tempo (min),  $i$  o contador de intervalos de tempo e  $n$  o número total de intervalos.

A equação utilizada relaciona a fração acumulativa da massa total de poluentes com a fração acumulativa do volume total escoado, e assim, é aplicada para analisar a variação de massa do poluente transportada ao longo dos escoamentos superficiais urbanos (SILVA, 2009). Outra forma simplificada de se obter o mesmo resultado é multiplicar o volume medido pela concentração em cada intervalo de tempo e fazer o somatório. Este cálculo foi realizado para obter a massa total carreada em cada evento de chuva simulado nesta pesquisa.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Análises dos parâmetros de qualidade água

Inicialmente foram feitas análises da qualidade da água utilizada nos procedimentos analíticos em laboratório e na simulação dos eventos. Os resultados da análise da água destilada para os parâmetros SST, DQO, Cu, Pb, Cr, Cd, Fe e Mn ficaram abaixo do limite de detecção dos métodos de análise, e a condutividade foi  $(9,0 \pm 1 \mu\text{S/cm})$ . Na água da torneira, utilizada para alimentar o simulador, os parâmetros em sua maioria também estiveram abaixo do limite de detecção, exceto para a condutividade que foi de  $(90,0 \pm 10 \mu\text{S/cm})$ , STD ( $45 \pm 5 \text{ mg/L}$ ), Fe ( $0,03 \pm 0,01 \text{ mg/L}$ ), Zn ( $0,02 \pm 0,01 \text{ mg/L}$ ) e Mn ( $0,003 \pm 0,002 \text{ mg/L}$ ).

Os resultados de qualidade da água do escoamento superficial em cada rua, para as duas intensidades de chuva, são apresentados nas figuras 3 e 4 por meio dos gráficos boxplot. Nestes gráficos foram usados os dados de todos os eventos simulados.

Na figura 3, observa-se a variação das concentrações medidas (média, mediana, valor máximo, valor mínimo e quartis) de SST, STD, DQO e de condutividade para as três ruas amostradas. Nesta, nota-se que as concentrações tendem a diminuir com o aumento da intensidade da chuva, fato que está relacionado com o efeito da diluição, uma vez que a maior intensidade proporciona maior volume de água, efeito este evidenciado nos quatro parâmetros.

Também na figura 3, nota-se que de modo geral, independentemente das intensidades de chuva simuladas, as menores concentrações de SST, STD, DQO e níveis de condutividade ocorrem na Av. Universitária, rua de maior fluxo. Tal observação pode ser explicada considerando que o maior tráfego de

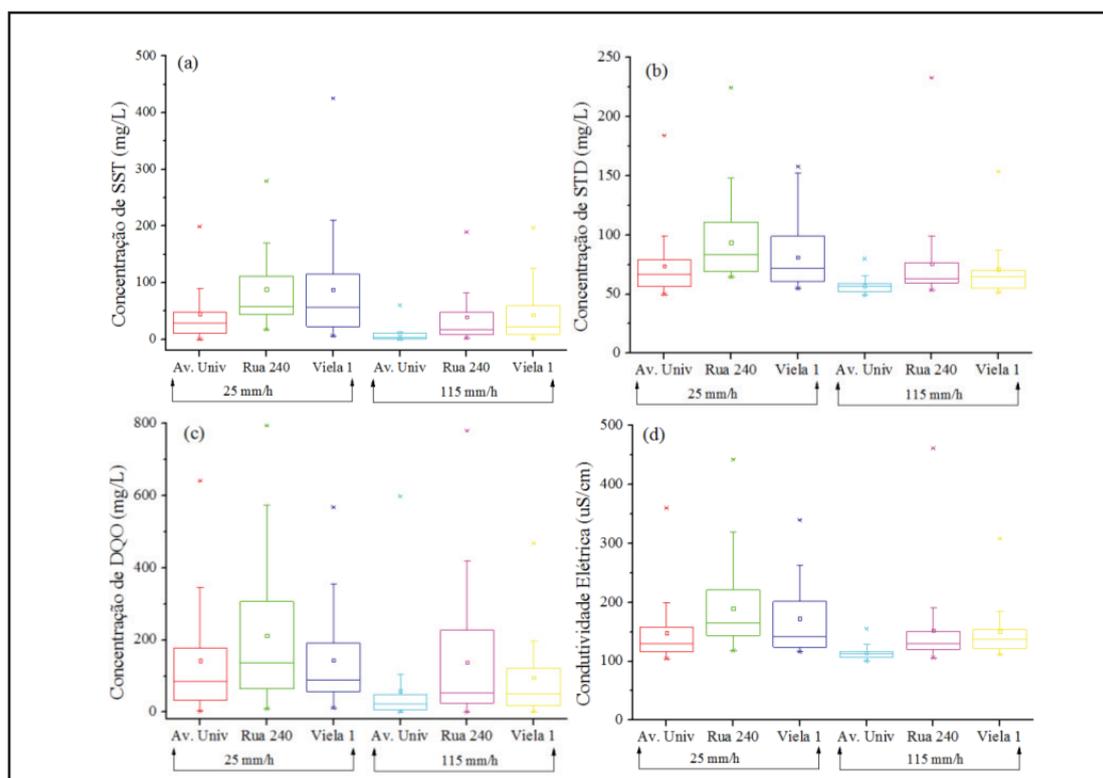


Figura 3 - Dispersão amostral das concentrações de (a) SST, (b) STD, (c) DQO e (d) Condutividade elétrica

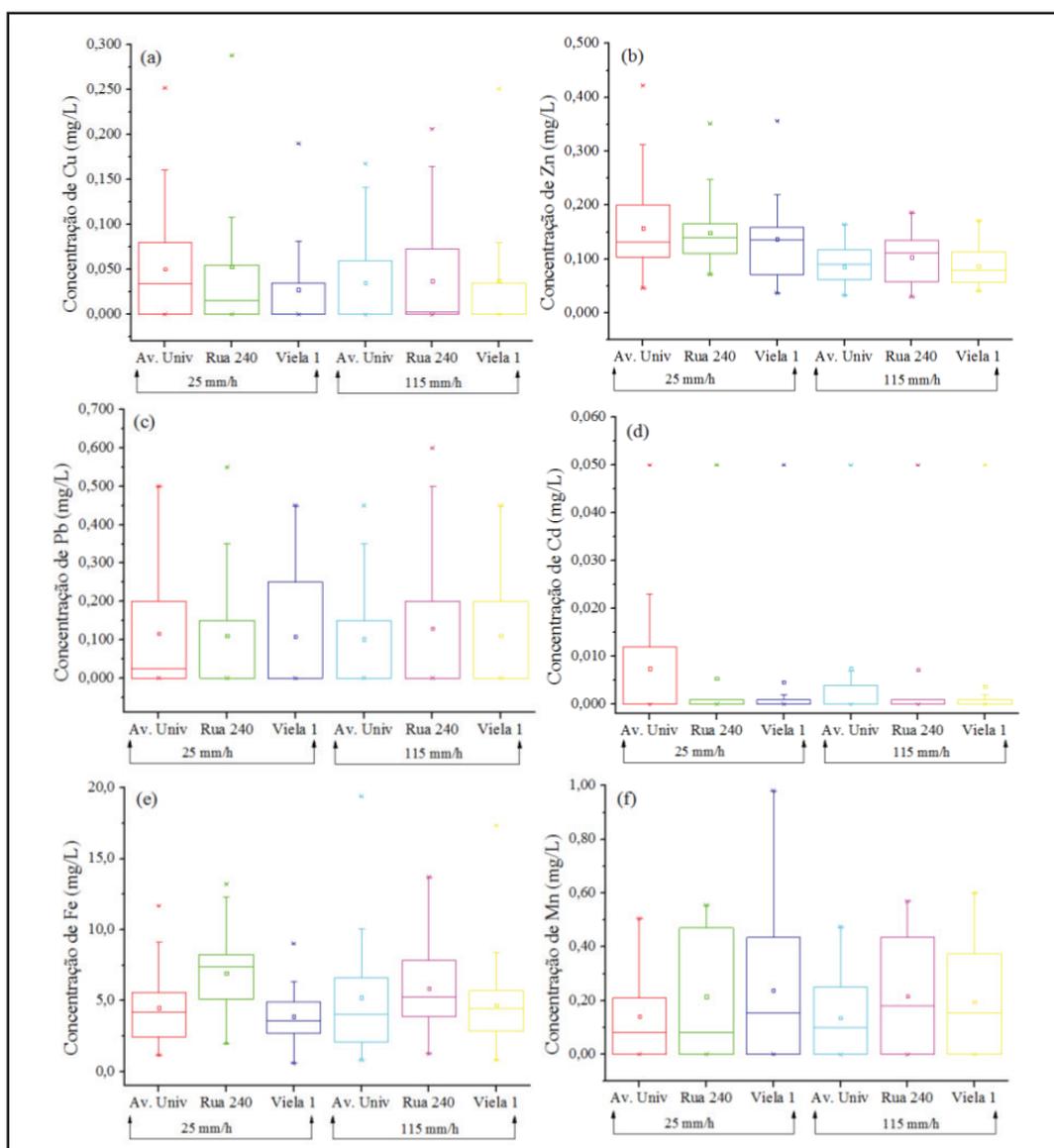


Figura 4- Dispersão amostral das concentrações de (a)Cu, (b) Zn, (c) Pb, (d) Cd, (e) Fe e (f) Mn

veículos propicia uma redistribuição dos sedimentos, ou seja, a passagem das partículas de uma área para outra área adjacente. Desta forma, espera-se que o acúmulo de sedimento seja menor onde o tráfego é mais intenso, assim há uma menor massa de sedimentos e de poluentes a ser transportada pelo escoamento. Ainda, ressalta-se que as parcelas amostrais onde foram realizados os experimentos estavam na faixa de circulação dos carros. Também ligado a este fenômeno não se pode deixar de considerar a maior frequência de limpeza desta via em relação às demais, e assim é menor a massa viável de ser carregada pelo escoamento superficial.

É também perceptível na figura 3 que as maiores concentrações ocorrem em geral na via de fluxo intermediário, Rua 240. Tal característica pode estar relacionada com o uso do solo na região, uma vez que esta rua possui muitas árvores cujos gravetos e folhas são carregados pela água e representam uma fonte de sólidos e matéria orgânica. Inclusive, da análise de DQO, figura 3-(c), nota-se que a Rua 240 possuiu as maiores concentrações de matéria orgânica para ambas as intensidades

de chuva.

Na figura 3-(d), apresenta-se a amplitude das medidas de condutividade elétrica, parâmetro intimamente relacionado com a concentração de íons dissolvidos, ou seja, relacionado com a concentração de sólidos, sobretudo os dissolvidos. Esta relação pode ser verificada observando o fato de que as medidas de condutividade e STD são correlacionadas, sendo a condutividade praticamente o dobro das medidas dos STD, figura 3-(b). Ainda, verifica-se que a rua com maiores valores são a Rua 240 e Viela 1 nas quais há um menor fluxo de veículos e é menor a frequência de varrição.

Na figura 4 são apresentadas as medidas de valor central (média e mediana) e de variação (amplitude e quartis) das concentrações dos metais Cu, Zn, Pb, Cd, Mn e Fe. Com relação aos metais analisados, somente o cromo não foi detectado, os outros metais em geral apresentaram grande variação de concentrações ao longo do escoamento superficial.

Diferentemente do que ocorreu para os SST, STD, DQO e condutividade, não se percebe na figura 4, o mesmo

Tabela 3- Variação dos parâmetros da águas de escoamento e comparação com valores da literatura

Parâmetro	Esta pesquisa (2015) Brasil	Herngren, Goonetilleke e Ayoko (2005) Austrália	Gromaire-Metz et al. (1999) França	Barrett et al. (1995) Texas, EUA	Tiefenthaler et al. (2001) Califórnia, EUA
SST (mg/L)	1,0-425,0	0,5-86,0	49-498	45-798	24-350
STD (mg/L)	49,6-232,9	10-250	----	----	----
DQO (mg/L)	<1,0-794,0	<0,001-9,4	----	----	----
CE ( $\mu$ S/cm)	51,2-461,5	27-665	----	----	----
Cu (mg/L)	<0,001-0,288	<0,001-0,04	0,027-0,191	0,022 – 7,033	0,009-0,078
Pb (mg/L)	<0,01-0,60	<0,001-0,03	0,071-0,523	0,073-1,780	0,010-0,059
Zn (mg/L)	0,032-0,186	<0,001-3,6	0,246-3,84	0,056-0,929	0,051-0,960
Cd (mg/L)	<0,001-0,050	<0,001-0,3	----	ND* – 0,040	0,001-0,033
Fe (mg/L)	0,82-19,4	<0,001-0,90	----	2,43-10,3	0,350-0,960
Mn(mg/L)	<0,001-0,98	<0,001-0,02	----	----	----

\* Não detectado

efeito de diluição sobre as concentrações de metais, ou seja, as concentrações médias e máximas no escoamento parecem ter pouca variação com a intensidade da chuva. Exceção ocorre com o zinco, figura 4-(b), cuja concentração diminui com o aumento da intensidade da chuva.

Na figura 4, observa-se que para a maioria dos metais, apesar da grande amplitude de variação de suas concentrações, os valores máximos e médios das concentrações estiveram em uma faixa relativamente estreita, independentemente da intensidade da chuva simulada ou via de estudo. O cobre, por exemplo, cujas concentrações estão representadas na figura 4-(a), teve suas concentrações médias em torno de 0,040 mg/L e máximas em uma faixa de (0,200–0,300 mg/L). O chumbo teve as concentrações médias em torno de 0,100 mg/L e máximas em uma faixa de (0,450 – 0,600 mg/L), conforme figura 4-(c). O cádmio, figura 4-(d), apresentou concentração média ao redor de 0,005 mg/L e não apresentou concentração máxima diferenciada (0,050 mg/L). De forma similar, o ferro, figura 4-(e), as concentrações médias estiveram em torno de 5,0 mg/L e as máximas em uma faixa de (10,0 – 20,0 mg/L). Ainda, as concentrações médias de manganês oscilaram em torno de 0,20 mg/L e as máximas na faixa de (0,450-0,600 mg/L) figura 4-(f).

Os valores de concentrações máximas e médias apresentados anteriormente fornecem uma ordem de magnitude das concentrações dos metais e podem servir de referência para outros estudos. É importante frisar que as médias apresentadas na figura 4 são médias aritméticas, as quais não levam em consideração a vazão diferenciada de cada intervalo de coleta. Esta consideração será feita na próxima seção deste trabalho em que os polutogramas são analisados conjuntamente com os hidrogramas.

Observa-se que todos os parâmetros obtiveram uma grande dispersão amostral, contudo deve-se ressaltar que as medidas foram feitas ao longo dos 15 minutos de chuva. Neste caso, os maiores valores de concentração correspondem aos instantes iniciais da chuva, em que a água está mais concentrada, e os menores valores aos instantes finais, em que a maior parte da massa depositada na área já havia sido removida. Também onde a amostragem consta com valores zero significa que as medidas foram menores que o limite de detecção do método utilizado para análise, que para o Cu, Cd e Mn foi < 0,001 e

Pb < 0,01mg/L.

Na tabela 3 é apresentada a comparação dos resultados desta pesquisa com outros trabalhos. Dos trabalhos elencados, o que mais se aproxima desta pesquisa em relação à metodologia utilizada é o do Herngren, Goonetilleke e Ayoko (2005), que também usou chuva simulada para caracterizar o carreamento de três ruas de usos distintos. Contudo, as concentrações de SST, Cu, Pb, Fe e Mn são inferiores em relação as encontradas nesta pesquisa. As concentrações de SST foram mais próximas as encontradas nos trabalhos de Gromaire-Metz et al. (1999) e Tiefenthaler et al. (2001). Dos metais, o Zn apresentou concentrações inferiores em relação a todos os outros estudos, e o Fe concentrações superiores.

### Hidrogramas e Polutogramas dos eventos simulados

Na figura 5, são apresentados os hidrogramas e polutogramas médios dos eventos simulados, gráficos que representam a vazão e a concentração no tempo para os parâmetros de SST, STD e DQO e para as intensidades de 25 mm/h e 115 mm/h. Estes polutogramas são médios, pois os dados foram obtidos a partir da média dos dois primeiros eventos simulados para cada intensidade, os quais foram realizados em parcelas diferentes em cada rua amostrada. Os polutogramas das figuras de 5 a 8 apresentam as massas totais carregadas durante os eventos de chuva simulados na Avenida Universitária ( $m_u$ ), Rua 240 ( $m_r$ ) e Viela 1 ( $m_v$ ), as quais foram calculadas por meio da Equação 1, bem como o volume total escoado. Em cada experimento com intensidades de 25 mm/h e 115 mm/h foram precipitados 19,2 e 93,9L, respectivamente.

Nestes polutogramas, pode-se observar que há uma tendência comportamental em que os picos de concentração dos parâmetros ocorrerem antes do pico do hidrograma, ou seja, as concentrações nos primeiros minutos de chuva são elevadas e decrescem com o tempo. Nota-se que as maiores concentrações são observadas nos primeiros 3 minutos de chuva, evidenciando o “*first-flush*”, ou seja, há uma carga de lavagem, a qual geralmente diminui com o aumento do tempo. Este mesmo efeito foi observado por diversos autores como Kim et al. (2007), Lee

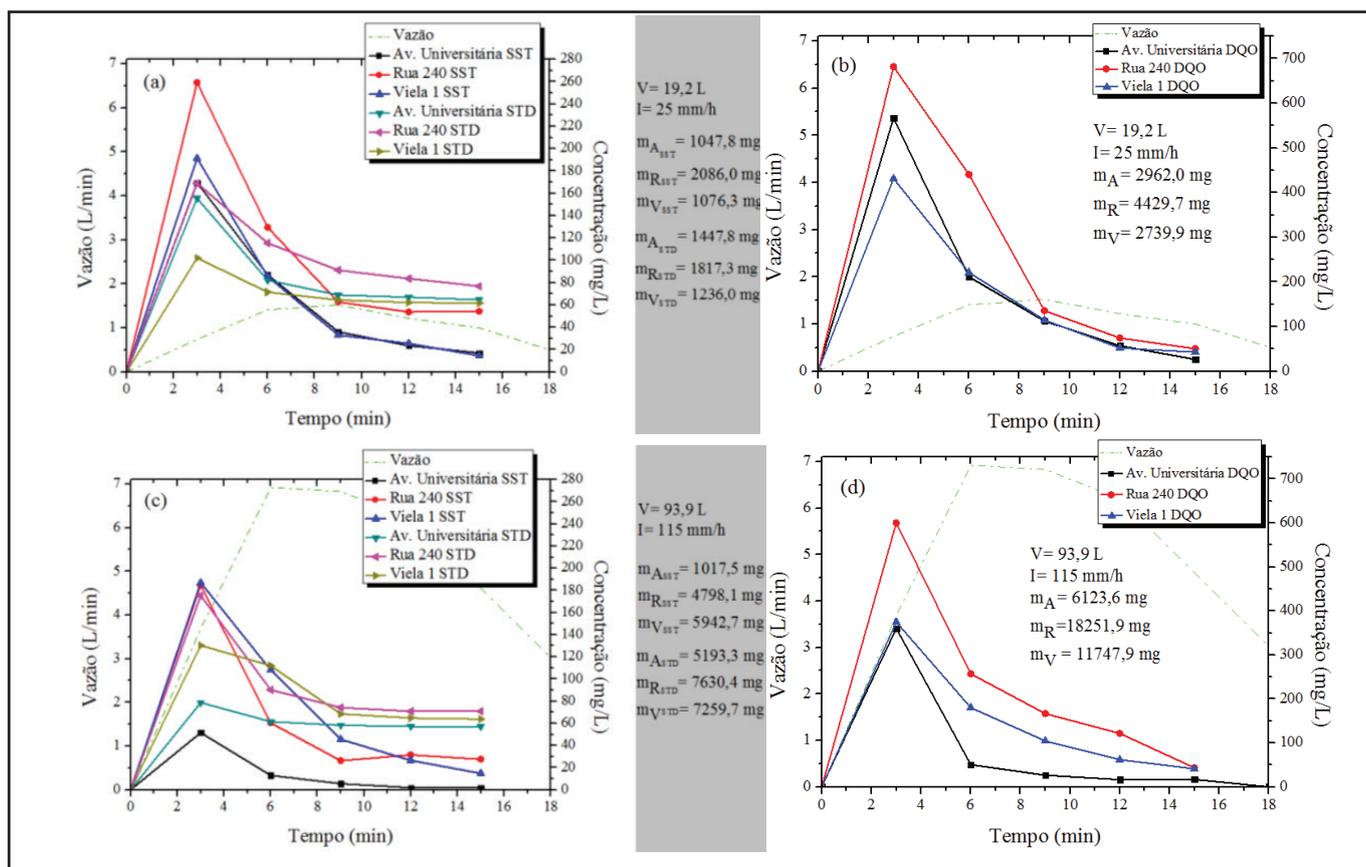


Figura 5- Polutogramas de (a) SST, STD e (b) DQO para a chuva de 25 mm/h e (c) SST, STD e (d) DQO para a chuva de 115 mm/h

et al. (2002) e Tiefenthaler et al. (2001).

Ainda na figura 5-(a) e (c), observa-se que as vias com maiores massas carreadas de sólidos suspensos e dissolvidos seguem em geral a ordem Rua 240 ≤ Viela 1 < Avenida Universitária, a qual está intimamente relacionada com a característica de ocupação da rua, conforme abordado na tabela 1, ou seja, as ruas com maior área permeável, maior presença de árvores e onde o serviço de limpeza urbana é ocasional, os sólidos tem maior probabilidade de acumular.

Os polutogramas de DQO, figura 5-(b) e (d), apresentaram um comportamento similar aos dos SST quanto ao decréscimo da concentração até um valor mínimo, ao contrário dos STD que após um decréscimo a concentração tende a ficar constante. As maiores massas de DQO foram carreadas na Rua 240, Viela 1 e Avenida Universitária, respectivamente. Fato que possivelmente está relacionado com a ocupação do solo, pois a Rua 240 tem um grande número de árvores que liberam material particulado e que elevam a carga orgânica do escoamento superficial.

Da relação da intensidade da chuva com a massa carreada, nota-se comparando os hidrogramas (a) e (b) e (c) e (d) da figura 5, que a chuva de maior intensidade, 115 mm/h, tende a carrear uma maior massa de sólidos e consequentemente de material orgânico. Verifica-se que as massas carreadas de SST, STD e DQO na chuva de 115 mm/h foram, em sua maioria, mais que o dobro em relação à massa carreada na chuva de 25 mm/h. Ainda, em relação ao STD, ressalta-se que na chuva de 25 mm/h as massas médias carreadas foram de 1447,8 mg, 1817,3

mg e 1236,0 mg, respectivamente para Avenida Universitária, Rua 240 e Viela 1, na mesma ordem para a chuva de 115 mm/h as massas carreadas foram de 5193,3 mg, 7630,4 mg e 7259,7 mg, nota-se que a massa carreada de STD na chuva de 115 mm/h chega a ser mais de 3 vezes maior do que a carreada na chuva de 25 mm/h. Este mesmo fato foi observado por Egodawatta, Thomas e Goonetilleke (2009), que observaram que as partículas finas tendem a ser carreadas em maior proporção com o aumento da intensidade da chuva.

Nas figuras de 6 a 8 são apresentados os polutogramas de cobre, zinco, chumbo, manganês e ferro. Os polutogramas de cádmio não foram apresentados, uma vez que as concentrações foram apenas detectadas ocasionalmente durante os experimentos.

Nos polutogramas dos metais, as concentrações foram irregulares no tempo, sendo que as maiores massas carreadas não foram detectadas necessariamente nos primeiros momentos do escoamento. Apesar deste comportamento, os dados não são considerados inconsistentes, pois em alguns estudos como explicado por Silva (2009), a carga de lavagem não é claramente verificada. Em alguns casos o polutograma pode parecer não ter uma relação clara com a duração da chuva. Ainda, ressalta-se que cada poluente apresenta concentrações variadas, porém com uma tendência de concentrações maiores na primeira metade do tempo de base, com algumas exceções.

Ainda, analisando as figuras de 6 a 8, observa-se que as massas totais carreadas durante os eventos de chuva são maiores para a intensidade de 115 mm/h para todos os metais do que para a intensidade de 25 mm/h, indicando que quanto maior a

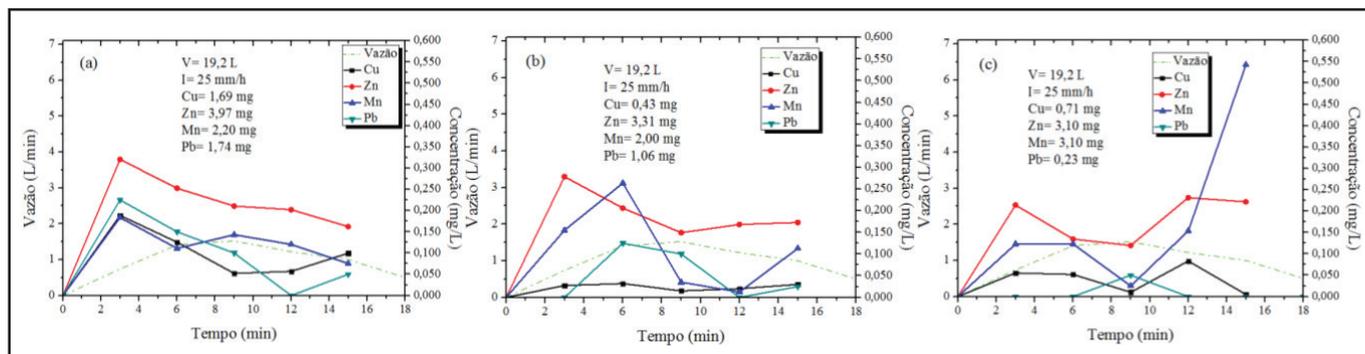


Figura 6 - Polutogramas de Cu, Zn, Mn e Pb para a chuva de 25 mm/h na (a) Avenida Universitária, (b) Rua 240 e (c) Viela 1

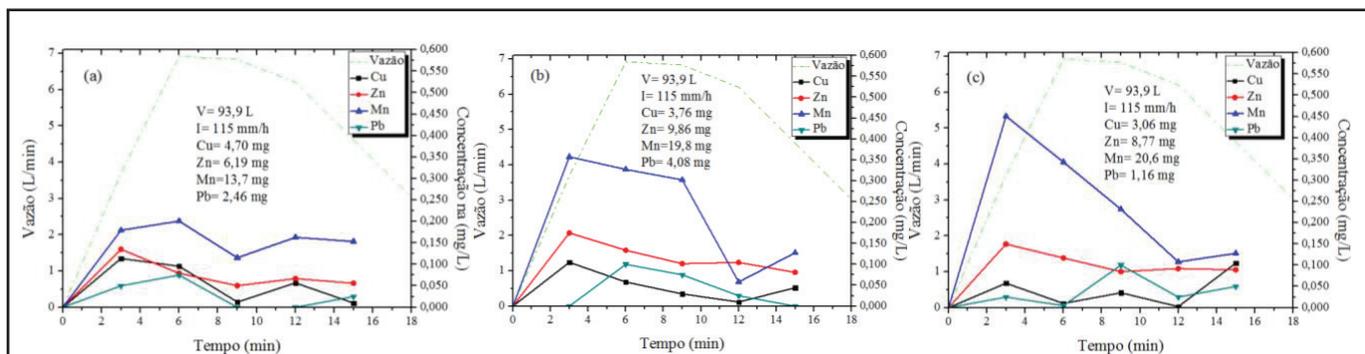


Figura 7 - Polutogramas de Cu, Zn, Mn e Pb para a chuva de 115 mm/h na (a) Avenida Universitária, (b) Rua 240 e (c) Viela 1

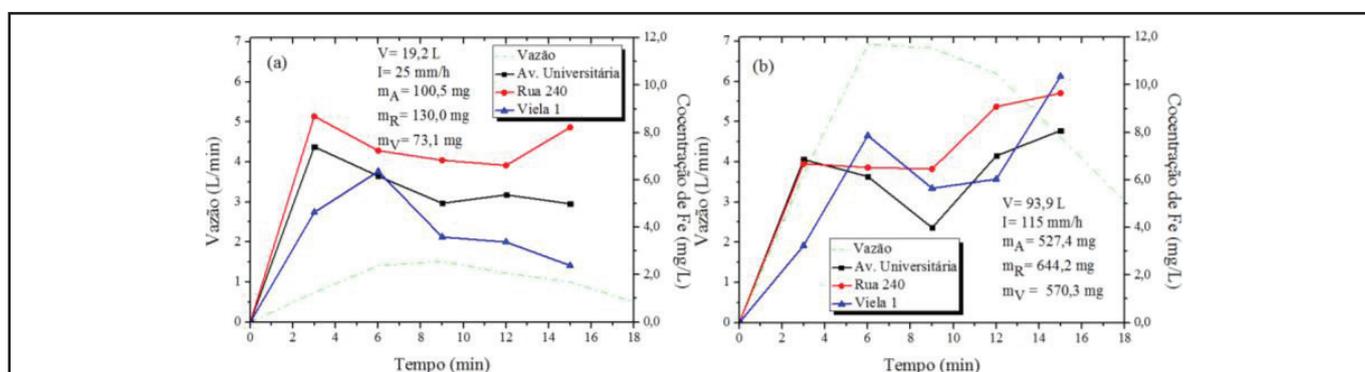


Figura 8 - Polutogramas de Fe para (a) chuva de 25 mm/h e (b) chuva de 115 mm/h para as três ruas amostradas

intensidade da chuva maior a probabilidade dos metais serem lixiviados e carregados pelo escoamento superficial. Estes dados podem ser observados comparando-se as massas totais carregadas, para cada metal, nas chuvas de 25 e 115 mm/h.

Da análise do carregamento de metais com o fluxo de veículos, verificou-se que não há uma relação direta entre ambos, uma vez que as massas de metais carregadas na Avenida Universitária, Rua 240 e Viela 1, ruas de alto, médio e baixo tráfego de veículos, respectivamente, foram semelhantes. O fato das concentrações serem similares no carregamento de poluentes em área urbana, também foi observado nos estudos da EPA (1999), que constataram que não há diferença significativa na concentração dos poluentes do escoamento superficial de diferentes categorias de uso do solo urbano. Os autores comentaram que a diferença só é expressiva quando se compara o escoamento de origem urbana com o rural.

A partir da similaridade, percebeu-se que o carregamento

de metais não depende somente do tráfego de veículos, e que as concentrações de metais somente devem ser correlacionadas com o tráfego de veículos em conjunto com outros fatores. O fato do carregamento dos metais não depender somente do tráfego de veículos, pode ser analisado tendo em vista que o carregamento de metais envolve processos físicos e químicos complexos, como a solubilidade do metal em água, o diâmetro das partículas que são carregadas, a idade do pavimento e a intensidade da chuva entre outros.

Neste sentido, foi possível observar que a intensidade da chuva afeta as massas carregadas de metais e também as espécies predominantes no escoamento. Por exemplo, na intensidade de 25 mm/h, figura 6, nota-se que o Zn foi encontrado em maiores concentrações que o Mn, e já na intensidade de 115 mm/h, figura 7, foi o Mn que foi encontrando em maiores concentrações. O mesmo fato ocorreu para o Pb e Cu. De maneira geral a seguinte ordem decrescente observada foi Fe

> Mn  $\approx$  Zn > Cu  $\approx$  Pb > Cd. Esses metais encontrados são de relevância ambiental, pois podem trazer impactos à saúde humana e à vida aquática. Por exemplo, o Fe e Mn são elementos com teor oxidante, dependendo das condições do meio, e podem provocar gosto, odor e coloração na água. Os elementos Zn e Cu são micronutrientes importantes para os organismos vivos, mas em excesso os mesmos podem provocar intoxicação, e sua acumulação pode provocar características teratogênicas e carcinogênicas. Já o Pb e o Cd não são elementos considerados micronutrientes essenciais, mas elementos contaminantes que possuem um elevado grau de toxicidade aos organismos vivos.

Ainda, neste aspecto, acredita-se que a relação dos metais com o tráfego de veículos é mais aplicada ao processo de acúmulo de sedimentos em superfícies asfálticas, *build-up*, e que o mesmo não se reflete diretamente sobre o carreamento de poluentes.

### Limitações do estudo

Por ser uma área de estudo pouco abordada, e não ter metodologias de coleta e análise padronizadas, e até mesmo padrões de aceitação, uma das dificuldades da pesquisa foi encontrar na literatura trabalhos específicos sobre o processo de carreamento, fato este que dificultou a comparação com outros estudos. Também, nesta área de pesquisa de carreamento de poluentes de superfícies asfálticas, alguns estudos são realizados com chuva natural, outros com chuva simulada, mas mesmo nestes, as intensidades e durações não coincidem para que os dados sejam comparáveis, pois os regimes de chuvas das regiões e países são distintos. Ainda, alguns experimentos são conduzidos faixa da sarjeta, outros na faixa de circulação de veículos em outros ainda, a água é coletada diretamente das redes de drenagem através de coletores automáticos. Fatores estes, que interferem na faixa dos resultados.

Outra limitação do estudo foi à representatividade da área estudada, que é muito pequena em relação à área de uma bacia hidrográfica (unidade de planejamento), bem como, o número de experimentos realizados. Neste caso, a transferência dos resultados dos parâmetros analisados para área de uma bacia se vê limitada, pois em uma bacia os usos do solo são variados, portanto, as concentrações deverão também ser diferentes.

Além das limitações já citadas, ressalta-se ainda, que os locais escolhidos para a realização da pesquisa nem sempre são os ideais. Mas estes foram escolhidos levando-se em consideração as condições que são necessárias para a realização do experimento, como exemplo, no caso da chuva simulada, os locais devem contar com acesso a pontos de água e energia, e causar o mínimo de perturbação para o tráfego de veículos, uma vez que não é qualquer rua ou avenida que é passível de ser bloqueada durante o período de realização dos experimentos.

No entanto, apesar destas limitações, o estudo fornece uma relevante base de dados, que pode ser empregada em modelos matemáticos de qualidade da água de drenagem, uma vez que os parâmetros analisados são usados como dados de entrada nestes modelos. Também o estudo apresenta informações e reafirmações relevantes sobre o processo de carreamento de poluentes. Estes dados e informações podem melhorar e

contribuir significativamente com a compreensão dos processos que determinam a qualidade da água urbana e, assim, oferecer subsídios para o projeto de medidas compensatórias de drenagem e gestão das águas pluviais.

### CONCLUSÃO

Os resultados apresentados mostram, em uma escala experimental, que o escoamento superficial urbano possui altas concentrações de poluentes como sólidos suspensos e dissolvidos, carga orgânica e, sobretudo de metais tóxicos, elementos estes de grande relevância no âmbito da poluição ambiental. Do grupo de metais avaliados nesta pesquisa, os mais recorrentes nas três ruas estudadas foram respectivamente,  $Fe > Mn \approx Zn > Pb \approx Cu > Cd$ , e apenas o cromo não foi encontrado. Os metais apresentaram uma ampla faixa de variação, porém com uma faixa estreita de valores de concentrações médias e máximas.

Da relação do fluxo de veículos com a concentração dos poluentes, observou-se que em geral, os sólidos tendem a diminuir com o aumento do fluxo de veículos. No entanto, a concentração dos poluentes está mais relacionada com as questões de uso e ocupação do solo de cada via, como quantidade de área impermeável e limpeza das vias, do que com o fluxo de veículos. O mesmo ocorreu para a matéria orgânica, DQO.

Para os metais, o carreamento também não apresentou ter relação direta com o fluxo de veículos, pois não se pode perceber diferença evidente entre as concentrações das vias. Desta forma, o tráfego de veículos é insuficiente, para ser usado como único fator na previsão da concentração de metais no escoamento de superfícies asfálticas, pois neste processo outros fatores interferem em maior grau.

Da relação da intensidade da chuva com o carreamento de poluentes, observou-se que a chuva intensa tende a carrear uma maior massa de poluentes, tal efeito foi verificado para todos os parâmetros analisados. Ainda, também se observou que a intensidade é um fator preponderante na lixiviação de alguns metais, ou seja, ela influencia as espécies predominantes no escoamento e a ordem de grandeza da concentração, e conseqüentemente, na massa carreada.

### AGRADECIMENTOS

A CAPES - Coordenação de Pessoal de Nível Superior, à FUNDEP - Fundação de Desenvolvimento de Pesquisa e a FINEP - Financiadora de Estudos e Projetos pelo apoio e suporte financiamento fornecida à pesquisa. Aos laboratórios de Geomorfologia, Pedologia e Geografia Física- LABOGEF do Instituto de Ciências Sócio - Ambientais na pessoa do professor Maximiliano Bayer e ao laboratório de Análise de Solo e Foliar - LASF na pessoa do professor Wilson Mozena pela parceria e apoio nas análises laboratoriais.

## REFERÊNCIAS

- APHA. *Standard Methods for the Examination of Water and Waste Water*. 19th ed. Washington: American Public Health Association, 1995.
- BARRETT, M. E.; ZUBER, R. D.; COLLINS, E. R.; MALINA, J. F.; CHARBENEAU, R. J.; WARD, G. H. *a review and evaluation of literature pertaining to the quality and control of pollution from highway runoff and construction*. Texas: Center for Research in Water Resources, University of Texas, 1995.
- BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DENIT. *Manual de estudos de tráfego*. Rio de Janeiro: DENIT, 2006.
- DAVIS, A. P.; SHOKOUHIAN, M.; NI, S. Loading estimates of lead, copper, cadmium, and zinc in urban runoff from specific sources. *Chemosphere*, v. 44, n. 5, p. 977-1009, Aug. 2001.
- DELETIC, A.; ORR, D. W. Pollution Buildup on Road Surfaces. *J. Environ. Eng.*, v. 131, n. 1, p. 49-59, Jan. 2005.
- EGODAWATTA, P. *Translation of small-plot scale pollutant build-up and wash-off measurements to urban catchment scale*. 2007. (Thesis) - Faculty of Built Environment and Engineering, Australia, 2007.
- EGODAWATTA, P.; GOONETILLEKE, A. Characteristics of pollution build-up on residential road surfaces. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON HYDROSCIENCE AND ENGINEERING, 7., Philadelphia, 2006. *Proceedings...* [S.l.: s.n.], 2006.
- EGODAWATTA, P.; THOMAS, E.; GOONETILLEKE, A. Understanding the physical processes of pollutant build-up and wash-off on roof surfaces. *Sci. Total Environ.*, v. 407, n. 6, p. 1834-1841, Mar. 2009.
- EPA- Environment Protection Agency. *Preliminary Data Summary of Urban Storm Water Best Management Practices*. Washington: EPA, 1999.
- GROMAIRE-MERTZ, M. C.; GARNAUD, S.; GONZALEZ, A.; CHEBBO, G. Characterization of urban runoff pollution in Paris. *Water Sci. Technol.*, v. 39, n. 2, p. 1-8, 1999.
- GUNAWARDANA, C.; GOONETILLEKE, A.; EGODAWATTA, P.; DAWES, L.; KOKOT, S. Role of solids in heavy metals build-up on urban road surfaces. *J. Environ. Eng.*, v. 138, n. 4, p. 490-498, Apr. 2012.
- HERNGREN, L. *Build-up and wash-off process kinetics of PAHs and heavy metals on paved surfaces using a simulated rainfall*. 2005. (Thesis) - Faculty of Built Environment and Engineering, Australia, 2005.
- HERNGREN, L.; GOONETILLEKE, A.; AYOKO, G. A. Understanding heavy metal and suspended solids relationships in urban stormwater using simulated rainfall. *J. Environ. Manage.*, v. 76, n. 2, p. 149-158, July 2005.
- IBGE- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Censo demográfico, 2010*. Rio de Janeiro: IBGE, 2010.
- KIM, L. H.; KO, S. O.; JEONG, S.; YOON, J. Characteristics of washed-off pollutants and dynamic EMCs in parking lots and bridges during a storm. *Sci. Total Environ.*, v. 376, n. 1-3, p. 178-184, Apr. 2007.
- LEE, J. H.; BANG, K. W.; KETCHUM, L. H.; CHOE, J. S.; YU, M. J. First flush analysis of urban storm runoff. *Sci. Total Environ.*, v. 293, n. 1-3, p. 163-175, July 2002.
- LI, L. Q.; YIN, C. Q.; HE, Q. C.; KONG, L. L. First flush of storm runoff pollution from an urban catchment in China. *J. Environ. Sci.*, v. 19, n. 3, p. 295-299, 2007.
- MIGUNTANNA, N. P. *Nutrients build-up and wash-off process in urban land uses*. 2009. (Thesis) - Faculty of Built Environment and Engineering, Australia, 2009.
- PITT, A.; BURTON, R. *Stormwater effects handbook: a toolbox for watershed managers, scientists, and engineers*. New York: CRC Press, 2001.
- SARTOR, J. D.; BOYD, G. B. *Water pollution aspects of street surface contaminants*. Office of Research and Monitoring U.S. Washington: Environmental Protection Agency, 1972.
- SILVA, A. H. C. L. *Controle da poluição difusa de origem pluvial em uma via de tráfego intenso por meio de trincheira de infiltração e vala de retenção*. 2009. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2009.
- SKOOG, D. A.; HOLLER, F. J.; TIMOTHY, A. *Princípios de análise instrumental*. 5. ed. Porto Alegre: Bookmam, 2002.
- SOUSA JUNIOR, S. F. S. *Desenvolvimento e avaliação de um simulador de chuva para estudos ambientais*. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente) - Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiania, 2011.
- TIEFENTHALER, L. L.; SCHIFF, K. D. S.; BAY, S. M.; DIEHL, D. Characteristics of parking lot runoff produced by simulated rainfall. Southern California Coastal Water Research Project, 7171 Fenwick Lane. Westminster, Ca: [s.n.], 2001. (Technical Report, 343).
- TUCCI, C. E. M. Drenagem urbana. *Ciênc. Cultura*, v. 55, n. 4, p. 36-37, out./dez. 2003.
- ZHAO, H.; LI, X.; WANG, X. Heavy metal contents of road-deposited sediment along the urban-rural gradient around Beijing and its potential contribution to runoff pollution. *Environ. Sci. Technol.*, v. 45, n. 17, p. 7120-7127, Sept. 2011.