

CARACTERIZAÇÃO DO ESCOAMENTO URBANO DE ORIGEM VIÁRIA E REMOÇÃO DE SEUS POLUENTES POR MEIO DE TÉCNICAS COMPENSATÓRIAS

André Silva¹; Nilo de Oliveira Nascimento²; Martin Seidl³ & Luciano Vieira⁴

RESUMO --- A poluição difusa é um grave problema enfrentado pelos grandes centros urbanos, como Belo Horizonte, em razão sobretudo, do elevado crescimento de suas populações, sendo este tema, pouco explorado ainda por estudos brasileiros. Para solucionar esses entraves, o uso de técnicas alternativas em drenagem urbana está sendo estudado por meio de pesquisas experimentais em escala real em algumas universidades brasileiras. Contudo, trabalhos que relacionem trincheira de infiltração e vala de detenção aos aspectos de qualidade da água são relativamente raros no Brasil, o que evidencia a relevância deste projeto de pesquisa. Portanto, este artigo apresenta resultados do primeiro ano de monitoramento hidrológico de uma trincheira e de uma vala, que recebem o escoamento superficial de um via de tráfego intenso da capital mineira. Sendo que, os principais resultados mostrados a seguir estão relacionados à caracterização qualitativa deste escoamento e à eficiência na remoção de sólidos suspensos e metais pesados por meio da vala de detenção.

ABSTRACT--- Although diffuse pollution is a serious problem faced by large cities such as Belo Horizonte, mainly because of the high growth of their populations, this theme is little explored by brazilian studies. To address these challenges, the use of alternative techniques in urban drainage is being studied in experimental researches, at some brazilian universities. However, studies that relate infiltration trenches and detention trenches to aspects of water quality are also relatively rare in Brazil, what highlights the relevance of this research project. Therefore, this article presents the results of the first year of hydrologic monitoring of a infiltration trench and detention trench, which receive the runoff from an intensive traffic road of Belo Horizonte. The main results shown below are related to the qualitative characterization of this flow and to the efficiency in the removal of suspended solids and heavy metals through the detention trench.

Palavras-chaves: Carga de lavagem, vala de detenção, eficiência .

1 Engenheiro, mestrando do Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente, Saneamento e Recursos Hídricos, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais. Departamento de Hidráulica e Recursos Hídricos. Avenida do Contorno, 842 – Centro – Belo Horizonte – MG – 30110-060. E-mail: andre.luiz@pbh.gov.br

2 Professor associado do Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente, Saneamento e Recursos Hídricos, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais. Departamento de Hidráulica e Recursos Hídricos. Avenida do Contorno, 842 – Centro – Belo Horizonte – MG – 30110-060. E-mail: niloon@ehr.ufmg.br.

3 Pesquisador convidado do Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente, Saneamento e Recursos Hídricos, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais. Departamento de Hidráulica e Recursos Hídricos. Avenida do Contorno, 842 – Centro – Belo Horizonte – MG – 30110-060. E-mail: martin.seidl@cereve.enpc.fr.

4 Engenheiro, mestrando do Programa de Pós-Graduação em Meio Ambiente, Saneamento e Recursos Hídricos, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais. Departamento de Hidráulica e Recursos Hídricos. Avenida do Contorno, 842 – Centro – Belo Horizonte – MG 1 – 30110-060. E-mail: roylcv@uol.com.br

1 INTRODUÇÃO

Os estudos referentes à poluição gerada pelo escoamento superficial em meio urbano datam de longo tempo em alguns países do mundo, contudo o Brasil ainda está em um patamar inicial (Prodanoff, 2005). Nos Estados Unidos, os relatos remetem à década de 60, quando a Agência de Proteção Ambiental (EPA) identificou que as cargas associadas às descargas ou vazões provenientes de cheias urbanas representavam grandes fontes de poluição dos corpos hídricos. Em 1972, em uma emenda constitucional chamada Clean Water Act, o Programa Nacional de Escoamentos Urbanos (NURP) foi estabelecido, contendo como meta principal ajudar na investigação da poluição das águas no ambiente urbano (USEPA, 1990). Os resultados apresentados no relatório final do NURP indicaram que as fontes de poluição difusa passaram a ser as maiores causadoras de degradação da qualidade das águas superficiais (USEPA, 1983).

Uma definição prática de poluição difusa foi proposta por Campbell *et al.* (2004): Poluição difusa é aquela oriunda das atividades exercidas ou ocupadas no solo (urbano ou rural) que são dispersos por toda área e não surgem como um efluente de um processo, esgoto municipal ou efluente de uma descarga de área urbana.

A origem dos poluentes é uma informação importante para a análise da poluição difusa. Nesse contexto, Chocat *et al.* (1997) apud Baptista *et al.* (2005) estimaram que 15% a 25% da carga de poluição de origem pluvial é diretamente atribuída à chuva. O restante provém do escoamento das águas pluviais sobre as superfícies urbanas onde os poluentes se acumulam em tempo seco, sendo uma de suas principais fontes a circulação de veículos.

Os sistemas tradicionais de drenagem parecem ser insuficientes e demasiadamente caros para gerenciar os escoamentos gerados pelas chuvas, tornando-se necessário intervir em todos os níveis do ciclo urbano da água, de modo a reduzir o volume do escoamento superficial e sua poluição. Portanto, o desenvolvimento de tecnologias alternativas surge como meio de controlar a poluição difusa, mas para isso, dados precisos sobre as características qualitativas do escoamento superficial gerado a partir de diferentes tipos de superfícies são de suma importância.

Dispositivos de armazenamento ou de infiltração de águas pluviais ou, ainda, que combinam ambos os processos são adotados há muitos anos em diferentes países (Browne *et al.*, 2007; Certu, 1998; Schueler, 1983; Fujita, 1994). No Brasil, a experiência com o emprego destas soluções, particularmente no caso de sistemas infiltrantes, é pequena e presente, sobretudo, em contexto de trabalhos de pesquisa (Souza e Goldenfum, 2004). O emprego mais generalizado dessas soluções requer iniciativas em diferentes domínios. Um dos mais importantes parece ser o de fazer face à natural resistência do meio técnico a soluções pouco conhecidas. É, portanto, relevante desenvolver experimentos com potencial de demonstração das características de desempenho, construtivas, de

emprego, e outras relativas a esses tipos de dispositivos, bem como capazes de se constituir em sítios para a capacitação e o treinamento.

A utilização dessas técnicas tem mostrado resultados interessantes em relação ao controle da poluição difusa. Segundo Cabtree *et al.* (2005) drenos filtrantes apresentaram remoções de até 50 % para os metais e de até 70 % para os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (PAHs), em escoamentos de estradas com alto fluxo de veículos, enquanto que tanques de sedimentação apresentaram remoções de até 64 % para os metais e de 43 % para os SST, para o mesmo tipo de escoamento.

Este artigo apresenta os resultados preliminares de uma pesquisa que tem por metas principais a melhoria do conhecimento sobre processos hidrológicos em meio urbano, em termos de quantidade e de qualidade de água, bem como aprimoramento de soluções tecnológicas inovadoras para o manejo de águas pluviais, como é o caso das técnicas compensatórias. Esses são temas atuais dos investimentos de pesquisa em hidrologia urbana, em contexto internacional.

2 ÁREA DE ESTUDO E DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO

No intuito de encontrar uma área que se adequasse aos objetivos do experimento, a equipe de pesquisa analisou diferentes locais no município de Belo Horizonte, com base em critérios ligados à adequação à técnica em foco (e.g.: capacidade de infiltração, declividade), às características da área de contribuição (e.g.: uso do solo, área de drenagem) e aos riscos associados ao vandalismo. Tendo em conta esses diferentes critérios, optou-se por realizar o experimento no próprio campus Pampulha da UFMG, em área localizada na bacia do córrego Mergulhão, afluente do reservatório da Pampulha.

A despeito de o experimento encontrar-se localizado no campus Pampulha, a captação de águas escoamento superficial faz-se em uma via de trânsito intenso na cidade de Belo Horizonte, a Av. Carlos Luz, o que assegura condições de funcionamento das estruturas de controle de escoamentos semelhantes à escala real de sua utilização, particularmente no que se refere aos aspectos de qualidade de água.

O solo predominante na área é o latossolo vermelho-amarelado, pouco espesso, de acordo com estudos realizados pela Prefeitura de Belo Horizonte (DRENURBS, 2002), o que asseguraria taxas de infiltração adequadas ao emprego da técnica de infiltração nessa área. Posteriormente, a condutividade hidráulica do solo local foi aferida por meio de ensaios com o permeâmetro de Guelph, resultando no valor médio final de $k = 5.21 \times 10^{-5}$ m/s, valor esse, típico de solos siltosos.

Investigações geotécnicas não revelaram a presença de lençol freático nos primeiros 4,0 metros de profundidade local. Atendendo assim, um dos critérios pelo ponto de vista ambiental e operacional segundo Baptista *et al.* (2005), o de haver uma distância mínima de 1,0 metro entre o

fundo da trincheira de infiltração e o lençol freático. O levantamento topográfico do local mostrou que a declividade do terreno é de 4,5%. Dessa forma, o quesito inclinação do terreno também foi atendido, haja vista que a capacidade de retenção das estruturas se apresentou suficiente.

O experimento instalado em área do campus da UFMG recebe escoamentos superficiais provenientes de uma via que liga a área central de Belo Horizonte à região Norte da cidade, a avenida Presidente Carlos Luz. A área de contribuição aos dispositivos experimentais, com 3.600 m², drena 4 pistas da avenida, no sentido Norte da cidade (figura 1). O escoamento gerado nessa área é drenado por sarjetas até uma boca de lobo, onde é coletado e conduzido até a área do experimento. O volume de escoamento superficial efetivamente coletado depende da eficiência de captação da boca de lobo, que varia com a vazão afluente. Estimativas preliminares do pico de vazão que o sistema é capaz de coletar indicaram valores em torno de 44 l/s, embora os resultados experimentais tenham indicado que ele pode captar vazões um pouco superiores, atingindo 50 l/s. Uma caixa de passagem permite a divisão dos escoamentos afluentes em duas partes, de forma a alimentar, simultaneamente, a trincheira de infiltração e a vala de detenção. As vazões afluentes aos dispositivos são monitoradas por meio de calhas Parshall implantadas no circuito de alimentação de cada dispositivo. As calhas são dotadas de sensores de pressão para o registro contínuo de profundidades de escoamento. A figura 2 ilustra uma vista parcial da área de contribuição.

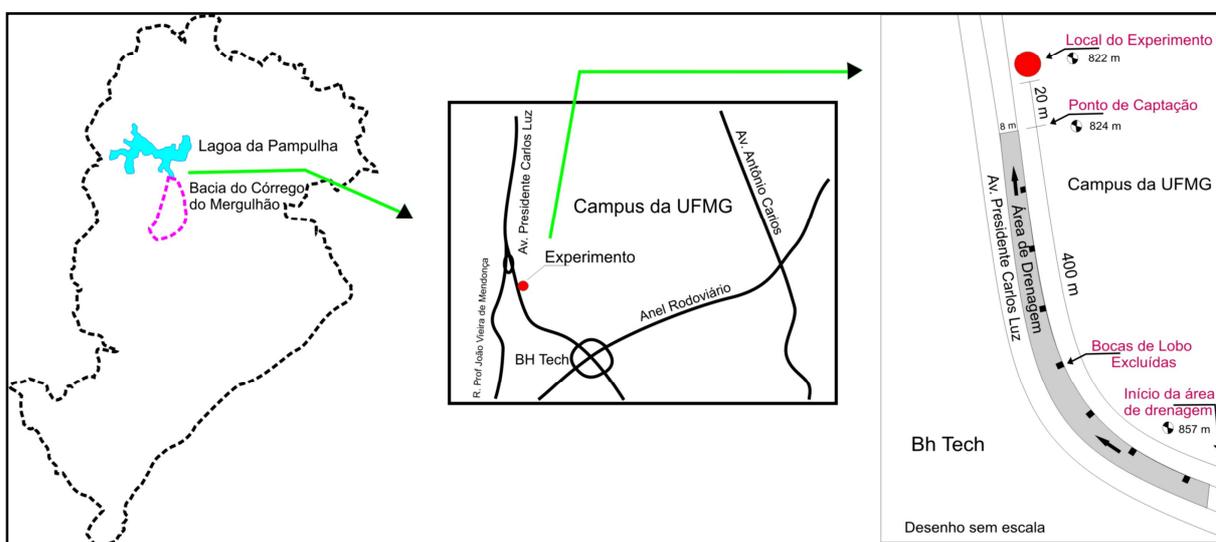


Figura 1 - Croquis de localização da bacia do córrego Mergulhão no município de Belo Horizonte e da localização do experimento na Av. Carlos Luz



Figura 2 - Vista parcial da área de contribuição, ponto próximo ao início do escoamento.

3 METODOLOGIA

3.1 Dimensionamento das estruturas

O experimento é composto pelas estruturas de captação, adução, medição de vazões, trincheira de infiltração e vala de detenção. O dimensionamento destes dispositivos encontra-se descrito a seguir.

3.1.1 Estrutura de captação: Boca de lobo

O dispositivo de captação de água na sarjeta da via foi dimensionado com base nas vazões de projeto definidas para as estruturas compensatórias. Foram consideradas, igualmente, restrições impostas por redes enterradas no passeio (cabos de fibra ótica) e outras possíveis interferências.

O tubo de captação de água, na boca de lobo (figura 3), foi dimensionado para a vazão de projeto como um bueiro, funcionando com controle hidráulico à entrada (controle de orifício). Como resultado dessa etapa, optou-se pelo emprego de um tudo de diâmetro 200 mm, implantado com declividade de 0,01 m/m, funcionando com vazão admissível de projeto de 44,0 l/s. O comprimento dessa tubulação é de 9 metros. O funcionamento dessa estrutura pôde ser determinado como bueiro com controle à entrada, uma vez ocorrido acúmulo de água somente na seção de entrada, conforme simulação utilizando-se o modelo HEC-RAS em regime de escoamento permanente e variado.

A figura 3 ilustra também a acumulação de sedimentos dentro da boca de lobo.



Figura 3 – Captação de água pela boca de lobo (esquerda), acúmulo de sedimentos (direita)

3.1.2 Estrutura de adução: Caixa de passagem

A caixa de passagem foi concebida para permitir a divisão das águas de escoamento destinadas a cada estrutura compensatória e para a amostragem da qualidade da água que entra no aparato experimental. As águas de escoamento são conduzidas às estruturas por meio de tubulações que, igualmente, foram concebidas para funcionar como bueiros com controle à entrada. Entretanto, para a vazão máxima de projeto, as condições locais de implantação e a localização das calhas Parshall, destinadas à medição de NA para cálculo da vazão afluyente às estruturas, afogam a saída

dos tubos e conduzem a seu funcionamento sob pressão. Não há restrições maiores a esse tipo de funcionamento, previu-se, para assegurar condições adequadas do escoamento interno à caixa de passagem a instalação de uma estrutura tranqüilizadora do escoamento dentro desta estrutura.

A altura desta caixa (35cm) foi projetada de tal maneira que não haja risco de extravasamento nos medidores de vazão, localizados logo a jusante.

A figura 4 ilustra a entrada e a saída da caixa de passagem, conjuntamente com o tranqüilizador de escoamento e o amostrador de PVC a montante da trincheira e da vala.



Figura 4 – Caixa de passagem: entrada e amostragem a montante (esquerda), saída e tranquilizador de escoamento (direita)

3.1.3 Estrutura de medição de vazão: Calha Parshall

As estimativas de vazões afluentes foram realizadas por meio de medidor de regime crítico do tipo Parshall. A escolha das dimensões das calhas foi feita com base na vazão máxima afluente calculada em 22,0 l/s por tubulação de adução, utilizando-se estruturas padronizadas segundo Azevedo Neto e Alvarez (1977).

As calhas foram construídas em acrílico, compreendendo a própria calha com garganta de 3 polegadas, um canal a montante, em seção transversal retangular, de 1,0 m de comprimento, e um canal a jusante, igualmente em seção transversal retangular, com 4,0 m de comprimento. A figura 5 ilustra as estruturas de medição da vazão afluente. A verificação do regime crítico no ponto de medição da calha Parshall foi realizada por meio do modelo HEC-RAS para diferentes vazões afluentes.



Figura 5 – Sistema com calha Parshall para medição da vazão afluente

3.1.4 Estruturas compensatórias: Trincheira de infiltração e vala de retenção

Para o dimensionamento da vala de retenção e da trincheira de infiltração, adotaram-se os seguintes métodos:

- Chuva de projeto com base na curva IDF regionalizada para a Região Metropolitana de Belo Horizonte (Pinheiro e Naguettini, 1998);
- Hidrograma de cheia: hidrograma triangular, tendo como tempo de base duas vezes a duração da chuva e como vazão de pico a calculada pela equação do método racional;
- Propagação de cheia na estrutura calculada pelo método de Puls;
- Tempo de retorno adotado em projeto: 10 anos, conforme recomendação usada pela Prefeitura de Belo Horizonte.

Adotou-se como duração da chuva de projeto o conceito de duração crítica, efetuando-se a modelagem hidrológica do funcionamento da estrutura para diferentes durações, a partir da duração 5 minutos, até atingir-se o máximo volume a ser armazenado na estrutura. Por fim, encontrou-se como duração crítica a precipitação de 30 minutos para ambas as estruturas.

No caso específico da trincheira de infiltração, a vazão de saída foi calculada pela Lei de Darcy (equação 1).

$$U = k * \left(\frac{\Delta H}{H_{total}} \right) \quad (1)$$

na qual:

U = velocidade do fluxo (m/s)

k = condutividade hidráulica saturada (m/s), (utilizado valor médio de medições realizadas)

$\frac{\Delta H}{H_{total}}$ = gradiente hidráulico (m/m)

As dimensões finais foram as seguintes: comprimento=20m; largura=1,0m; profundidade média =1,5m. A figura 6 mostra a configuração final da trincheira.



Figura 6 – Configuração final da trincheira de infiltração (vista de jusante para montante)

Para o cálculo da vala de retenção, as vazões de saída foram baseadas na Teoria dos Orifícios (equação 2).

$$Q = C_d * A * \sqrt{2gh} \quad (2)$$

na qual:

Q = vazão (m^3/s)

C_d = coeficiente de descarga, (valor usado: 0,6)

A = área da seção transversal (m^2)

h = altura de carga a partir do eixo do orifício de saída (m)

As dimensões finais foram as seguintes: comprimento=12m; largura=3,0m; profundidade=1,5m. A figura 7 ilustra a configuração final desta estrutura.



Figura 7 – Configuração final da vala de detenção (vista de jusante para montante).

3.2 Coleta dos dados

O protocolo de monitoramento do experimento encontra-se sinteticamente ilustrado na figura 8.



Figura 8 – Análise esquemática do monitoramento do experimento

O monitoramento compreende as seguintes variáveis hidrológicas:

- Chuva, medida por um pluviógrafo de balança instalado a cerca de 500 m da área do experimento, pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET);
- Vazão de entrada ao dispositivo medida por calha Parshall equipada com sensor piezoresistivo;

- Níveis de água armazenada em cada dispositivo, medidos por sensores piezoresistivos, permitindo a estimativa dos volumes armazenados e das vazões de saída durante os eventos, por meio do emprego da equação de continuidade;
- Monitoramento da qualidade da água por meio da coleta de amostras compostas à entrada (figura 4) e à saída dos dispositivos, e utilização de amostrador automático ISCO 3700 para a amostragem à entrada do sistema. Os parâmetros de monitoramento da qualidade da água são condutividade, temperatura, turbidez, solos suspensos totais, nitrogênio total, fósforo total, metais pesados (Cu, Cr, Ni, Zn, Cd, Pb, Mg), DQO, DBO₅, coliformes totais e E.coli.

Todas as análises laboratoriais seguiram as recomendações do “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater”, 21ª edição da American Public Health Association (APHA *et al.*, 2005).

Durante a construção da trincheira de infiltração, amostras do solo foram coletadas em 4 profundidades diferentes, a partir do fundo do dispositivo: 0,5, 1,0, 1,5 e 2,0 m. Essas amostras foram submetidas a análises físico-químicas de modo a detectar a presença no solo de poluentes como metais pesados (Cu, Ni, Zn, Cd, Mg, Pb, Cr), hidrocarbonetos polinucleares aromáticos (HPA), Norgtot e Ptot e COT anteriores à operação da trincheira de infiltração. Os resultados obtidos caracterizam que o estado inicial do solo no local de implantação da trincheira não apresentou contaminação pelos poluentes analisados. Serão realizadas análises semelhantes sobre amostras de solo obtidas no mesmo local, após um ano de operação da trincheira e ao final do projeto, 2011, totalizando três anos de operação. Esse procedimento possibilitará a estimativa dos riscos de contaminação do solo devido à operação da trincheira de infiltração.

3.3 Análise dos dados

3.3.1 Distribuição de massa e volume nos eventos amostrados

Uma metodologia bastante difundida em todo o meio acadêmico, para a análise da variação da taxa de massa poluente transportada ao longo dos escoamentos superficiais urbanos, é a curva M(V), a qual relaciona a fração acumulativa da massa total do poluente vs. a fração acumulativa do volume total escoado em um sistema cartesiano. A curva M(V) possibilita também uma análise adimensional capaz de confrontar eventos de diferentes características e localização.

Para cada evento monitorado a representação mencionada acima é feita a partir de N medições da vazão Q_i e da concentração C_i a cada intervalo Δt_i , e considerando-se que tanto a vazão quanto a concentração variam linearmente entre duas medições. A construção da curva M(V) é feita com base na equação 3. (Bertrand-Krejewski *et al.*, 1998).

$$\frac{\sum_{i=1}^j C_i Q_i \Delta t_i}{\sum_{i=1}^N C_i Q_i \Delta t_i} = f \left(\frac{\sum_{i=1}^j Q_i \Delta t_i}{\sum_{i=1}^N Q_i \Delta t_i} \right) = f \left(\frac{\sum_{i=1}^j V_i}{\sum_{i=1}^N V_i} \right) \quad (3)$$

na qual:

N = número total de medições,

j = índice de 1 a N,

V_i = volume (litros) descarregado durante o intervalo de tempo Δt_i (s),

Δt_i = intervalo de discretização do hidrograma (s),

C_i = concentração do poluente medida a cada intervalo de tempo. (mg/L),

Q_i = vazão de entrada (L/s).

Por meio de análises gráficas das curvas M(V), pode-se saber a distribuição dos poluentes ao longo de todo o evento, observando-se a posição das curvas em relação ao bisetor. Se a curva confunde-se com o bisetor, assume-se que os poluentes são distribuídos uniformemente durante o evento. Quando a curva permanece acima do bisetor, há a ocorrência da carga de lavagem, e quando a curva permanece abaixo do bisetor, não há a ocorrência de carga de lavagem. (Dotto, 2006).

3.3.2 Cargas de sólidos por evento

Para uma avaliação global do impacto das cargas difusas, pode-se calcular o fator Concentração Média no Evento (CME), que em um só valor resume a relação entre a massa de poluente transportada pelo volume de água escoado. A CME representa a concentração ponderada de um poluente correspondente a um evento completo de chuva, por meio da coleta de diversas amostras ao longo do tempo de duração do escoamento, juntamente com o levantamento do hidrograma (USEPA, 1990).

A equação 4 apresenta o cálculo da CME, a qual é definida pela massa total do poluente dividida pelo volume total, ao longo de todo o evento.

$$CME = \frac{M}{V} = \frac{\int_0^t C_i Q_i dt}{\int_0^t Q_i dt} = \frac{\sum C_i Q_i \Delta t}{\sum Q_i \Delta t} \quad (4)$$

na qual:

CME = concentração média do evento chuvoso monitorado (mg/L);

M = massa total do poluente descarregado ao longo do evento (g);

V = volume total ao longo do evento (m³);

C_t = concentração no tempo t (mg/L);

Q_t = vazão no tempo t (m³/s);

Δt = intervalo de tempo (s).

Inicialmente, as amostras a montante do experimento foram coletadas pelo amostrador de PVC (figura 4), projetado para captar o início do evento, considerando a hipótese de ocorrência do first-flush no escoamento.

O amostrador ISCO 3700 não estava disponível desde o início do monitoramento, bem como o sensor de nível que detecta o começo do evento. Instrumentos esses, que automatizariam a amostragem.

A partir de março de 2009 a amostragem automática foi iniciada, contando até o presente momento com 03 eventos coletados. Com a continuidade do monitoramento nos anos hidrológicos 2009-2010 e 2010-2011 espera-se poder contribuir na relação entre os dados obtidos com o amostrador de PVC e o amostrador automático. Os objetivos destes ensaios são, por um lado, procurar avaliar com mais precisão as cargas de poluição monitoradas no passado com o PVC e, por outro lado, avaliar o desempenho deste método de monitoramento simplificado em face da amostragem automática mais custosa e vulnerável ao vandalismo. Apesar do reduzido número de amostras coletadas com o amostrador automático, fez-se um ensaio de estabelecimento da referida relação, embora obviamente ainda sem validade estatística.

O primeiro procedimento para a elaboração do coeficiente foi a separação dos eventos que apresentaram o fenômeno carga de lavagem e os que não apresentaram, por meio de análise gráfica da curva $M(V)$ de cada evento. Dentre as três chuvas amostradas automaticamente, duas mostraram a ocorrência do fenômeno. E entre os oito eventos coletados de outubro de 2008 a fevereiro de 2009, seis se comportaram de maneira muito semelhante àqueles que indicaram a presença de carga de lavagem.

Em seguida, analisou-se a correlação da concentração de sólidos suspensos totais encontrada no amostrador de PVC (CPVC) e a CME dos primeiros 32 minutos de cada evento. Uma vez que, neste intervalo de tempo presenciou-se a quase totalidade da carga de sólidos. Por fim, o coeficiente para CME/CPVC foi de 0,531.

3.3.3 *Representatividade dos eventos amostrados*

Visando verificar a representatividade hidrológica dos eventos amostrados neste estudo, analisaram-se as precipitações ocorridas no período entre outubro de 2008 e maio de 2009. Ressalta-se que os esses dados pluviométricos foram coletados por meio da estação meteorológica Pampulha do INMET, localizada a cerca de 500m do experimento. Para confirmar essa representatividade, utilizaram-se os dados pluviométricos entre 1994 e 2004 da estação meteorológica Usina de Gás, localizada a cerca de 5.000m do local de estudo.

Primeiramente, definiu-se que os eventos chuvosos seriam considerados independentes a partir do momento em que os efeitos resultantes do primeiro cessassem antes do início do segundo. (Caramori, 2002). Portanto, baseado nas duas técnicas compensatórias instaladas no campus UFMG, trincheira de infiltração e vala de detenção, e de tal forma que ambos dispositivos possam recuperar parte das condições de funcionamento anteriores ao evento, estipulou-se que o intervalo mínimo entre duas precipitações independentes seria de 12 horas.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados são listados apenas para a vala de detenção. De fato, a coleta de água realizada por dispositivo de captação de água percolada a partir da trincheira evidenciou inconsistências devido ao carreamento de solo sob o dispositivo. Posteriormente, foram executadas intervenções no dispositivo com vistas a eliminar este comportamento anômalo, porém resultados de análise de qualidade de água para a trincheira de infiltração não se encontram ainda disponíveis.

4.1 Sedimentos coletados na boca de lobo

Depósitos de sedimentos e outros materiais foram coletados na boca de lobo, em doze ocasiões diferentes. Análises físicas desses depósitos permitiram que fossem classificados em três categorias: sedimentos (material granular); lixo, composto principalmente de papel, plástico, metal e vidro, assim como de matéria orgânica, constituída principalmente por folhas e gravetos (ver tabela 1). O número de amostras analisadas é ainda pequeno para se investigar as relações entre o peso e composição dos depósitos com a duração dos períodos secos e as características da chuva. Contudo, parece evidente que o parâmetro altura de precipitação é o que melhor se correlaciona com a distribuição de massa dos sedimentos coletados. Haja vista, o aumento relativamente proporcional do percentual de sedimentos na composição e no peso total com o aumento das alturas de precipitação (tabela 1). Há que se ter em conta que houve deterioração do pavimento durante o período chuvoso amostrado, causando, ao longo do tempo, um aumento da superfície erodível na área de contribuição.

Uma informação importante para as relações supracitadas é a existência de varrições, a princípio duas vezes por semana, da sarjeta adjacente à área de drenagem. Procedimento esse, que até o presente momento não possui a quantificação da sua influência nas características dos depósitos coletados na boca de lobo.

Tabela 1 – Características dos depósitos na boca de lobo à entrada do sistema

Dias secos antes da chuva	Altura da precipitação	Int. média da chuva	Massa de material granular		Massa de folhas de gravetos		Massa de papel, plástico, vidro e metal		Massa total da amostra
			(Kg)	(%)	(Kg)	(%)	(Kg)	(%)	
	(mm)	(mm/h)	(Kg)	(%)	(Kg)	(%)	(Kg)	(%)	(Kg)
21.00	0.0	0.0	6.50	53.4	5.00	41.1	0.68	5.6	12.18
1.50	4.2	3.9	8.09	95.3	0.17	2.0	0.23	2.7	8.48
4.80	11.8	1.9	13.12	87.6	0.37	2.5	1.48	9.9	14.98
5.50	12.8	3.8	23.82	82.9	4.88	16.6	0.14	0.5	28.84
23.00	13.4	2.3	49.30	92.0	2.50	4.7	1.77	3.3	53.56
8.00	13.6	6.8	17.26	96.4	0.36	2.0	0.29	1.6	17.90
12.00	19.8	19.8	25.50	97.7	0.26	1.0	0.33	1.3	26.10
23.00	13.4	2.3	49.30	92.0	2.50	4.7	1.77	3.3	53.56
30.00	23.8	11.8	62.80	84.0	10.00	13.4	1.98	2.6	74.78
11.00	66.8	6.7	67.45	89.0	8.11	10.7	0.24	0.3	75.80
0.50	82.0	40.7	2.01	91.1	0.03	1.4	0.17	7.5	2.20
0.45	95.6	9.4	49.85	96.8	1.43	2.8	0.19	0.4	51.47
5.00	321.8	7.0	98.01	99.3	0.27	0.3	0.46	0.5	98.74

4.2 Remoção de sólidos suspensos

Amostras compostas de água foram coletadas, entre outubro de 2008 e fevereiro de 2009, à entrada e à saída dos dispositivos para avaliação de seu desempenho em termos de abatimento da poluição difusa de origem pluvial proveniente da área de contribuição. A partir de março de 2009 incluiu-se a amostragem automática com o aparelho ISCO 3700 à entrada do sistema.

A tabela 2 apresenta resultados de análises de qualidade de água realizadas nessas amostras para o parâmetro sólido suspenso total (SST). Ressalta-se, por outro lado, que durante o período coberto pelo monitoramento da vala de retenção o pavimento da via sofreu processo de degradação, resultando em pontos de ruptura e levando a processos de erosão da base e da sub-base da via. Com isso, a produção de sedimentos da área de contribuição aumentou com o tempo.

Analisando os resultados, nota-se que a eficiência inicial da vala de retenção apresenta um comportamento bem padronizado para remoção de sólidos, com um desvio padrão razoavelmente baixo (ver figura 9), variando entre 58% a 81% de remoção de SST. Percebe-se que as variáveis de precipitação não influem muito nesta eficiência. Funcionamento esse esperado, devido aos eventos analisados serem semelhantes, ou seja, todos apresentaram carga de lavagem. Portanto, as comparações sempre foram baseadas nas concentrações dos primeiros 4 minutos a montante com as CME a jusante.

Entretanto, verificando os valores de remoção de sólidos corrigidos pelo coeficiente CME/CPVC (ver item 3.3.2), nota-se que a eficiência da vala começa a entrar em consonância com os dados pluviométricos e com o tempo de retenção averiguado, pois as chuvas mais intensas (31/10/08 e 01/02/09) apresentaram maior eficiência, enquanto àquelas de grande duração tiveram

comportamento inverso (tabela 2). Embora, ressalta-se que esta correção encontra-se ainda em um nível bastante grosseiro, haja vista o seu alto desvio padrão (figura 9), e que futuramente com mais eventos amostrados ela será melhor ajustada.

Em termos de eficiência, ambas as análises estão em consonância com a literatura técnica. Vale destacar que o tempo de detenção de uma dada chuva deve ser correlacionado com a duração daquele evento, ou seja, para uma maior eficiência da vala de detenção este tempo deve ser superior à duração da precipitação.

Neste estudo o tempo de detenção foi calculado a partir dos registros efetuados pelo sensor piezoresistivo dos níveis de água internos à vala. Portanto, caso essa linha d'água fosse maior que o diâmetro do orifício de saída, este momento era considerado como tempo de detenção.

Tabela 2 – Remoção de sólidos suspensos totais pela vala de detenção

Evento	Precipitação			Qualidade da água			Parâmetros da vala		
	Período seco anterior (dia)	Duração (min)	altura (mm)	SST ent. (mg/l)	SST* entr. (mg/l)	SST saída (mg/l)	Eficiência inicial	Eficiência corrigida*	Tempo de detenção (min)
31/10/08	12	30	19.8	1596	847	308	81%	64%	55
7/11/08	1.5	240	18.6	616	327	256	58%	22%	200
8/12/08	9.0	75	13.6	1660	881	702	58%	20%	98
22/12/08	3.0	30	4.8	1452	771	529	64%	31%	54
01/02/08	4.0	15	4.2	1451	770	183	87%	76%	62
13/02/08	0.5	360	62.6	1763	936	766	57%	18%	345

*valores corrigidos pelo coeficiente CME/CPVC (ver item 3.3.2)

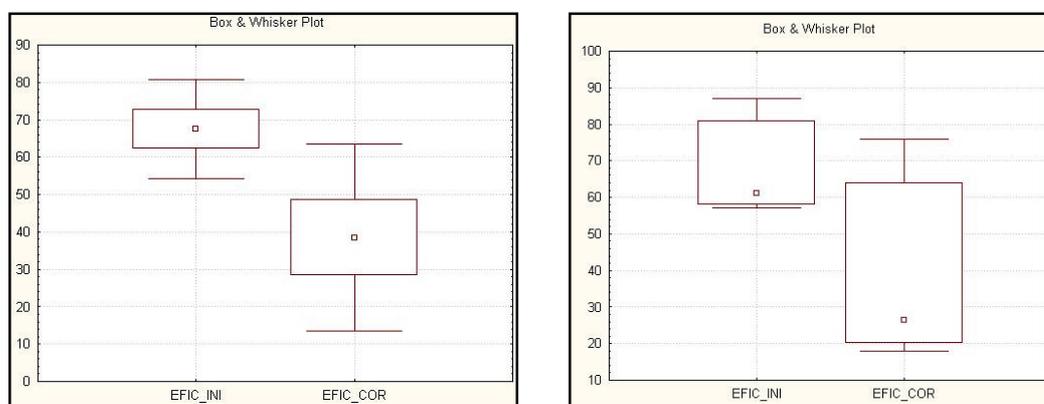


Figura 9 – Média (à esquerda) e mediana (à direita) da eficiência inicial e da eficiência corrigida da vala de detenção e seus respectivos desvios padrões.

4.3 Remoção de metais pesados

Para análise dos metais pesados não foi elaborado um coeficiente de correção, pois até o momento somente um evento (30/03/2009) possui os resultados desses poluentes. Tal fato se explica pela quebra do aparelho que realiza a leitura das concentrações de metais pesados nas amostras.

O monitoramento da série de metais pesados para os seis eventos citados anteriormente, (ver tabela 3), evidenciou que as águas de escoamento superficial provenientes da área de contribuição

não atendem os limites da resolução CONAMA 357/2005 (CONAMA, 2005) para o padrão de classe 2. De uma forma geral, a exceção do Ni e do Cr, todos os demais poluentes analisados violam os limites mencionados, particularmente o Cu, o Zi, o Pb e o Mn. Esses poluentes, tipicamente, têm origem na infra-estrutura viária e na circulação de automóveis; o desgaste de pneus é a principal fonte de Cu e Zi; a abrasão do pavimento asfáltico origina o Pb e o Mn tem origem na erosão do solo ou, eventualmente, no desgaste de peças de aço. Ressalta-se que o Cd não ultrapassou o limite de detecção (LD) (0.002 mg/L) utilizado no laboratório de saneamento da UFMG. Dessa maneira, a hipótese de ausência de Cádmio no escoamento superficial nos 06 eventos analisados foi assumida.

As remoções de todos os metais apresentaram valores razoavelmente próximos, em torno de 55%, valor coerente com a remoção média da vala (60%, ver figura 10), à exceção do Pb com 88,6%. Comportamento explicado talvez pela fonte principal do chumbo, o desgaste do pavimento asfáltico, que por sua vez está vinculado às partículas maiores, as quais são mais facilmente retidas pela vala de detenção. Os valores relativamente elevados dos desvios padrões encontrados (tabela 3) são comuns em dispositivos de detenção, frequentemente associados à re-suspensão de sedimentos antigos pelos novos eventos chuvosos. A figura 10 ilustra mais claramente esta variação do desvio padrão.

Tabela 3 - Remoção média de metais pesados pela vala de detenção dos 06 eventos analisados

	Entrada média	% de eventos com concentração acima da norma	Saída média	% de eventos com concentração acima da norma	Remoção média	Desvio padrão da remoção
	mg/L		mg/L		%	%
Cr	0.034	0%	0.029	0%	59.0	26.5
Cu	0.087	100%	0.069	100%	43.6	18.8
Pb	0.047	100%	0.017	0%	88.6	9.4
Zn	0.394	100%	0.253	33%	52.1	19.9
Ni	0.017	17%	0.015	0%	57.5	12.2
Cd	<LD		<LD		-	-
Mn	0.505	100%	0.304	100%	55.1	22.7

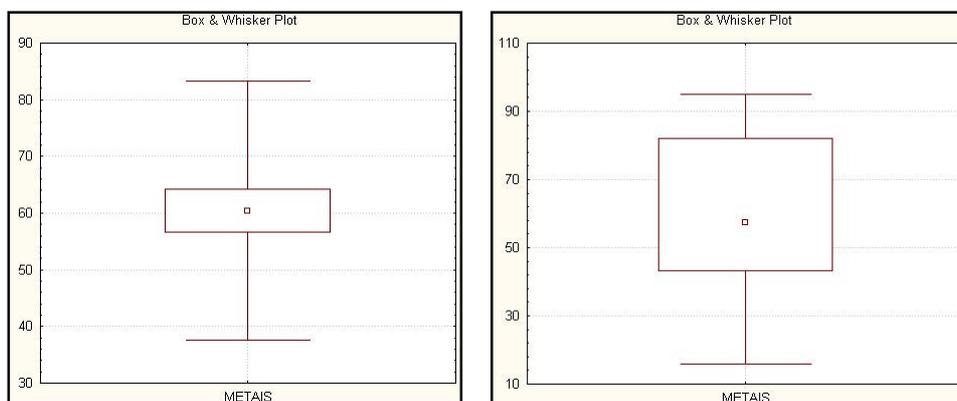


Figura 10 – Média (à esquerda) e mediana (à direita) da remoção dos 06 metais pesados por meio da vala de detenção e seus respectivos desvios padrões, para os 06 eventos monitorados.

4.4 Caracterização do escoamento superficial

Após o início da utilização do amostrador automático, pôde-se caracterizar a relação das cargas de poluentes ao longo de um evento de forma mais concreta, por meio das concentrações médias do evento (CME). O primeiro evento coletado foi o de 30/03/2009, o qual já possui todos os resultados, sendo assim, ele serve como exemplo até o momento. Os parâmetros seguintes foram analisados: DBO₅, DQO, E.coli, Coliformes totais, metais (Cr, Cd, Pb, Zn, Ni, Mn, Cu), nitrogênio total e fósforo total, (ver tabela 4).

Dentre os resultados destaca-se o elevado índice de coliformes presente no escoamento, valores semelhantes àqueles encontrados em esgoto doméstico. A proximidade de uma cavalaria da polícia militar ao experimento, e por consequência uma pequena presença de esterco de cavalo na via, podem talvez explicar essa contaminação. Outro destaque é a ocorrência pela primeira vez de cádmio no escoamento. Mostrando assim a importância da amostragem ao longo do evento. Esse metal é originado do desgaste de pneus.

Em relação ao nitrogênio total e ao fósforo total, esses não obtiveram concentrações superiores ao limite de detecção usado (0,59 mg/L e 0,20 mg/L respectivamente). A ausência destes elementos está relacionada à pouca presença de matéria orgânica no escoamento, haja vista os valores apresentados na tabela 1 (ver item 4.1). Fato esse, que explica também os baixos valores amostrados para DQO e DBO₅.

Tabela 4 – CME de todos os parâmetros analisados no escoamento superficial referente ao evento de 30/03/2009.

Parâmetro	Unidade	CME
DBO ₅	mgO ₂ /L	24
DQO	mgO ₂ /L	287
E.coli	NMP/100ml	3.64 x 10 ⁴
Coliformes totais	NMP/100ml	1.86 x 10 ⁵
Cr	mg/L	0.072
Cd	mg/L	0.005
Pb	mg/L	0.036
Zn	mg/L	0.389
Ni	mg/L	0.024
Mn	mg/L	0.533
Cu	mg/L	0.095
Nitrogênio total	mg/L	<L.D.
Fósforo total	mg/L	<L.D.

A precipitação de 30/03/2009, que apresentou um total de 4,4mm em 45 minutos, ilustra claramente um comportamento típico da maioria dos escoamentos superficiais analisados, a ocorrência do fenômeno denominado carga de lavagem, o qual apresenta um volume inicial de poluentes bastante superior ao restante do evento. A figura 11 mostra a relação chuva-vazão do evento mencionado anteriormente.

A figura 12 mostra a evolução dos sólidos e da condutividade ao longo do escoamento. Nesta figura, pode-se observar que a condutividade mostra uma proporcionalidade inversa com o fluxo, um padrão típico de diluição com as chuvas. Para este caso, o pico do hidrograma corresponde praticamente ao pico do polutograma, com um atraso de 8 minutos somente, que é um valor próximo do tempo de concentração da área de drenagem. Lembrando que 50% do fluxo de sólidos entraram nos primeiros 12 minutos.

Ressalta-se o nível surpreendentemente elevado de sólidos, mesmo ao final do evento. A principal fonte destes sólidos é a erosão do asfalto da via mostrando cada vez mais pontos de ruptura no pavimento ao final da estação chuvosa.

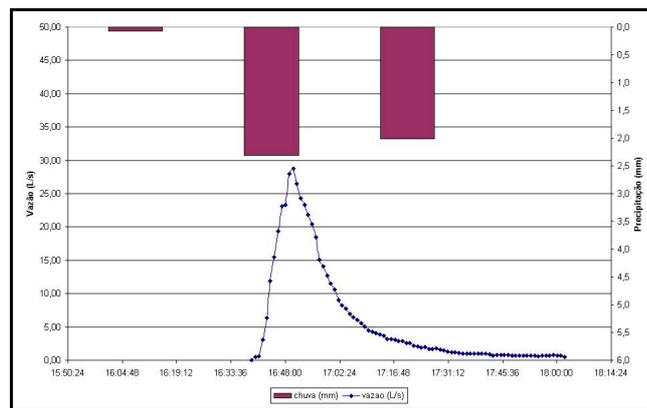


Figura 11 – Relação chuva-vazão do evento de 30/03/2009.

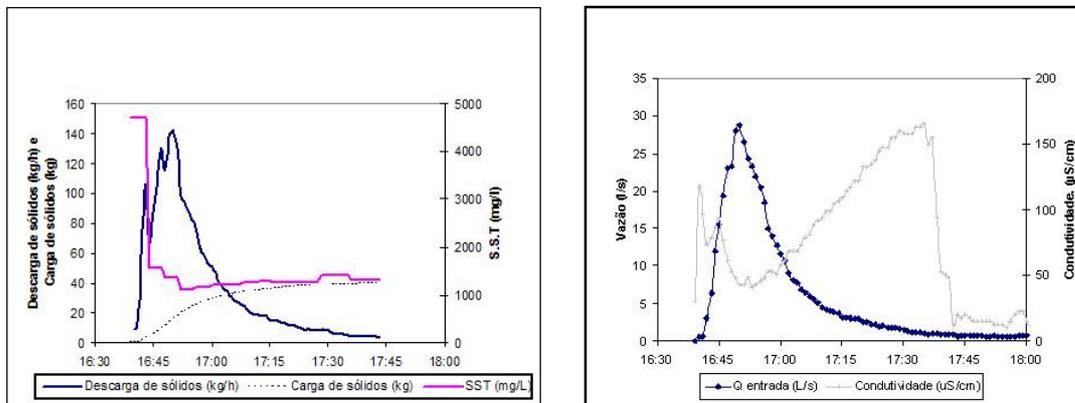


Figura 12 – Polutograma vs. hidrograma (à esquerda) e correlação vazão de entrada e condutividade (à direita) do evento de 30/03/2009

Analisando o comportamento dos metais pesados monitorados ao longo do evento por meio das curvas M(V), percebe-se claramente o fenômeno carga de lavagem para todos (figura 13). Confirmando assim, a forte ligação entre SST e metais pesados. Entretanto, após análise da evolução das concentrações dos metais pesados ao longo do evento de 30/03/2009 (figura 13), nota-se um aumento razoável de suas concentrações ao final do escoamento. Situação essa, explicada pela forte adsorção dos metais pesados às partículas finas, que por sua vez predominam ao final do escoamento superficial.

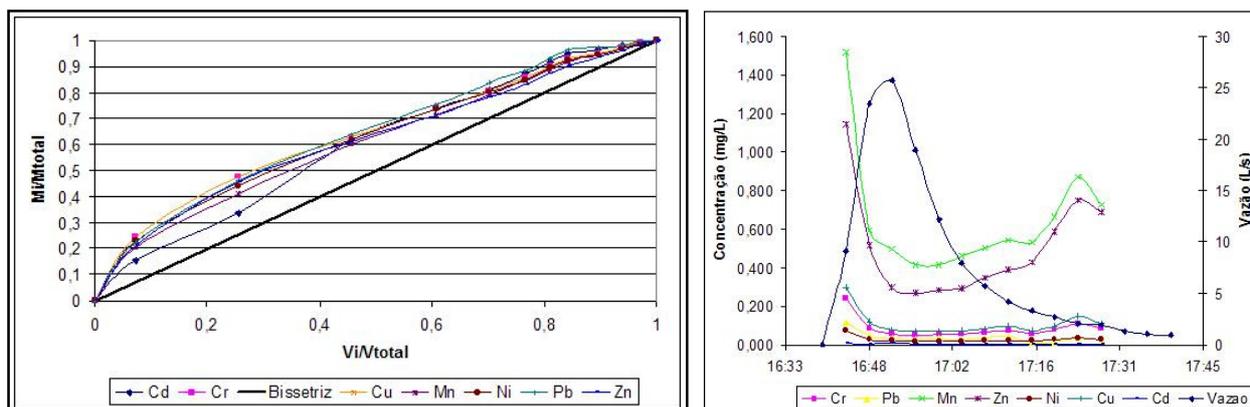


Figura 13 – Curvas M(V) dos metais pesados monitorados no evento de 30/03/2009 (à esquerda), evolução das concentrações de metais pesados no evento de 30/03/2009 (à direita)

4.5 Representatividade dos eventos amostrados

Uma análise estatística da quantidade de chuvas por faixas de alturas de precipitações foi elaborada para verificar a representatividade dos eventos amostrados. A figura 14 mostra que 26% das precipitações no período chuvoso entre outubro de 2008 e maio de 2009 ficaram na faixa de 0 a 5 mm, e que a maioria das chuvas permaneceram abaixo dos 60mm.

A mesma análise estatística discutida acima foi elaborada para os dados pluviométricos de 1994 a 2004 para confirmar essa representatividade. Ela mostrou que o período de 2008/2009 é bastante representativo para a distribuição média de chuvas em função do total precipitado por evento.

Por fim, sabe-se que as amostras coletadas nesta pesquisa se encontram concentradas dentro da maior faixa de precipitações, evidenciando assim a boa representatividade dos eventos monitorados. Entretanto, em função do reduzido número de amostras o gráfico da figura 14 não ilustra claramente a representatividade hidrológica dos eventos amostrados.

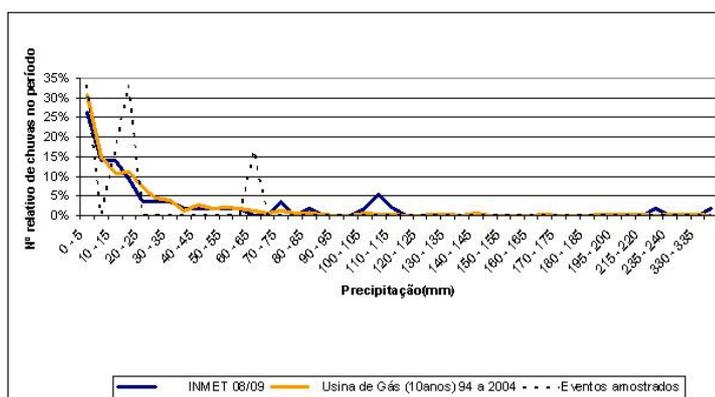


Figura 14 – Análise quantitativa do número de chuvas por faixa de alturas de precipitações

5 CONCLUSÕES

Apesar do pequeno número de eventos obtidos, os resultados aqui apresentados e avaliados sugerem que dispositivos de retenção se mostram uma possibilidade interessante para gerenciar a carga de poluentes com origem em sistemas viários. A redução desta carga estaria ligada

principalmente com poluentes associados à suspensão, tais como metais pesados ou SST. Os resultados também sugerem que as melhorias na manutenção do sistema viário podem desempenhar um papel relevante para a redução da carga poluidora dos escoamentos superficiais durante a estação chuvosa.

Deve-se destacar também, a inesperada e elevada contaminação do escoamento por coliformes totais, chegando a valores semelhantes aos de esgoto doméstico.

Acredita-se que, com o aprimoramento do aparato experimental e a constituição de uma série mais longa de dados de monitoramento, os experimentos aqui descritos possibilitarão novos desenvolvimentos em termos de análise estatística, modelagem de diferentes fases dos processos de escoamento pluvial e o funcionamento dos dispositivos, análises de incertezas em medições e modelagem, entre outras atividades futuras a serem realizadas pelos projetos PROSAB e SWITCH em Belo Horizonte.

AGRADECIMENTOS

Essa pesquisa é apoiada pelo projeto SWITCH (6º Programa Quadro da Comunidade Européia), assim como pelas agências federais brasileiras CNPq (PQ e concessão de pesquisadores visitantes, programa PROSAB), Finep (programa PROSAB) e a agência estadual de fomento à pesquisa de Minas Gerais, Fapemig (Programa PPM).

BIBLIOGRAFIA

APHA/AWW/WEF. (2005). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* 21st ed., American Public Health Association/American Water Works/Water Environment Federation, Washington, DC, USA. 650 p.

AZEVEDO NETO, J.M., ALVAREZ G.A. (1977), *Manual de hidráulica*, volume II, ed. Edgard Blücher Ltda, São Paulo- SP, 668 p.

BAPTISTA, M.; NASCIMENTO, N.; BARRAUD, S. (2005), *Técnicas Compensatórias em Drenagem Urbana*. Porto Alegre: ABRH, 266 p.

BERTRAND-KREJEWSKI, J-L.; CHEBBO, G., SAGET, A. (1998), “*Distribution of Pollutant Mass vs Volume in Stormwater Discharge and The First Flush Phenomenon*”, *Wat.Res.*, v. 32, No. 8, pp. 2341-2356.

BROWNE, D., DELETIC, A., MUDD, G., FLETCHER, T.D. (2007). “*A new model for stormwater infiltration systems*” In: 6th International conference on innovative technologies in urban drainage, NOVATECH, Lyon, 2007, p. 623-630.

CAMPBELL, N.S.; NOVOTNY, V.; D'ARCY, B. (2004). *Diffuse pollution: An introduction to the problems and solutions*. London: IWA Publishing, 292 p.

- CARAMORI, V. B.S., (2002) *Estudo experimental de trincheiras de infiltração no controle da geração do escoamento superficial*, Tese (Doutorado) Departamento de Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Porto Alegre – RS, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 151 p.
- CRABTREE, B.; MOY, F.; WHITEHEAD, M. (2005). “*Pollutants in highway runoff*” In: 10th International Conference on Urban Drainage, Institute of Environment & Resources Technical University of Denmark e Section of Environmental Engineering Aalborg University, Copenhagen/Denmark, Aug. 2005, CD-ROM.
- CONAMA.(2005), Resolução n. 357, de 17 de março de 2005. Brasília: Ministério do Meio Ambiente - Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA).
- DOTTO, C.B.S (2006) *Acumulação e Balanço de Sedimentos em Superfícies Asfálticas em Área Urbana de Santa Maria – RS*. Dissertação de Mestrado. Santa Maria, RS: Universidade Federal de Santa Maria / Centro de Tecnologia Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 126 p.
- DRENURBS. (2002) *Diagnóstico Sanitário e Ambiental Bacia do Córrego Engenho Nogueira*, volume 1- tomo 1, Belo Horizonte, 230 p.
- PINHEIRO, M. e NAGHETTINI, M. “*Análise regional de frequência e distribuição temporal das tempestades na região metropolitana de Belo Horizonte*”. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Volume 3 n.4, Out/Dez 1998. p 73-88.
- PRODANOFF, J.H.A. (2005), *Avaliação da Poluição Difusa Gerada por Enxurradas em Meio Urbano*, Tese de Doutorado (Ciências em Engenharia Civil). Rio de Janeiro – RJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro / Programas de Pós-Graduação de Engenharia, 276 p.
- SOUZA, V. C. B.; GOLDEFUM, J. A. (2004). “*Critical analysis of data from two infiltration trenches under subtropical climate conditions*” In: 5th International Conference on Sustainable Techniques and Strategies in Urban Water Management, Lyon, Jul.2004, CD-ROM.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA), (1983), Results of the Nationwide urban runoff program, Volume 1 – Final Report. Water Planning Division, U.S. USEPA, Washington, DC.
- UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA), (1990), Technical Support Document for Water Quality-based Toxics Control. In: Office of Water, USEPA, Washington, D.C.