

## IX-025 - CARACTERIZAÇÃO QUALITATIVA E QUANTITATIVA DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL DIRETO PREDIAL E *FIRST FLUSH*

**Leonardo Kenji Maeda<sup>(1)</sup>**

Engenheiro Ambiental (EESC/USP), Mestrando em Engenharia Urbana pela Univ. Federal de São Carlos (UFSCar)

**Rodrigo Moruzzi**

Engenheiro Civil (UFSCar), Mestre e Doutor em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Professor Adjunto III da Univ. Estadual Paulista, UNESP, Campus de Rio Claro, SP.

**Ademir Paceli Barbassa**

Engenheiro Civil (UFMG), Mestre e Doutor em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP). Professor Associado IV da Univ. Federal de São Carlos, UFSCar, Campus de São Carlos, SP.

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Rua 24 de maio, 265, Jardim São Carlos - São Carlos – SP – CEP 13560-643 – Brasil – Tel (16) 3306-6584 – e-mail: nardo.maeda@gmail.com

### RESUMO

O escoamento superficial direto (ESD) é a parcela da água da chuva precipitada que não infiltra, não é interceptada pela vegetação e não fica retida em reservatórios e superfícies. Como a urbanização usualmente é acompanhada de impermeabilização do solo, ela ocasiona um incremento no escoamento superficial direto (ESD). O aumento da vazão e do volume escoado frequentemente está relacionado com o carregamento de sedimentos acumulados na bacia de contribuição do escoamento, sendo este um dos maiores fatores causadores da poluição difusa de corpos d'água receptores e na colmatção de estruturas destinadas à infiltração do ESD como poços de infiltração e bacias de retenção. O estudo da qualidade e da quantidade de ESD permite subsidiar a tomada de decisão dos elementos a jusante do escoamento. Pretendeu-se realizar a caracterização qualitativa e quantitativa do ESD por evento de um ambiente urbano através da medição da vazão escoada e coleta de amostras ao longo do escoamento gerado por evento de chuva e análise de turbidez e sólidos suspensos totais. Também pretendeu-se investigar a ocorrência do efeito do *first flush* através da construção e análise de curvas acumuladas adimensionais de massa de sólidos carregados e volume de água escoada.

**PALAVRAS-CHAVE:** Drenagem urbana, monitoramento hidrológico, *first flush*.

### INTRODUÇÃO

O escoamento superficial direto (ESD) corresponde à parcela da chuva que efetivamente escoar sobre a superfície, ou seja, é a diferença entre o volume de água precipitado e a soma dos volumes interceptado em vegetações, evapotranspirado para a atmosfera, infiltrado no solo e retido em superfícies e depressões no relevo.

Nas áreas urbanas, como o índice de cobertura impermeável é elevado, as parcelas infiltradas e interceptadas pela vegetação são menores que em áreas rurais, então o ESD é maior e mais intenso, ou seja, é mais volumoso e com maior pico de vazão. O ESD de área urbana normalmente implica na lavagem da cidade, já que os resíduos sólidos, sedimentos e impurezas existentes nas superfícies dos terrenos são carregados pelas enxurradas e grande parte afastada da região urbana juntamente com volumes expressivos de água para regiões topograficamente abaixo no terreno. Essa abordagem clássica segue o paradigma de descartar com rapidez para jusante o excesso de água gerado em cada subárea da bacia hidrográfica urbana. Esse excedente pluvial normalmente é visto como gerador de alagamentos e inundações e transportador de resíduos, sedimentos e contaminantes (RIGHETTO, 2009).

Nesse sentido, Prodanoff (2005) afirma que o desenvolvimento urbano convencional tem como consequência inerente e imediata o aumento da quantidade de superfícies impermeabilizadas, e que além, as águas pluviais

de ESD provenientes destas áreas podem conter uma quantidade significativa de poluentes. O autor destaca ainda como grande impacto ambiental negativo o praticamente inevitável lançamento desta carga nos corpos hídricos receptores.

Em contrapartida, uma nova vertente de abordagem no manejo de águas pluviais tem sido investigada e empregada, baseada em propostas que buscam a mitigação local do excedente de ESD gerado nas áreas urbanas (TUCCI, 2005). Para isto é fundamental que se conheça a natureza do líquido escoado, suas características qualitativas e quantitativas. Segundo Righetto (2009), estudos de quantidade e qualidade das águas pluviais vêm sendo realizados no escopo da hidrologia ambiental urbana e a primeira etapa das pesquisas envolve o monitoramento quali-quantitativo das águas pluviais

O conhecimento das características quantitativas e qualitativas do escoamento superficial direto possibilita a melhor compreensão do comportamento de fenômenos e estruturas a jusante, como assoreamento, poluição e colmatção.

Prodanoff (2005) afirma que a concentração da primeira parte do ESD, conhecida como primeira descarga ou carga de lavagem (*first flush*, em inglês, ou *premier flot*, em francês) geralmente possui concentrações significativamente maiores de poluentes que as concentrações do período final das chuvas. Baptista et al. (2015) associam os seguintes fatores para a ocorrência desta primeira descarga: lavagem dos poluentes na forma particular dispersos na atmosfera pelas águas de precipitação; mobilização e transporte dos poluentes acumulados sobre as superfícies da bacia hidrográfica durante o período seco, que antecede as precipitações; e suspensão e transporte dos sedimentos acumulados na rede drenagem.

Baptista et al. (2015) reiteram ainda que caso o efeito da primeira descarga seja generalizado, a concepção de estruturas para o controle de poluição de origem pluvial poderia ser orientada a reter apenas os volumes iniciais de escoamento. Contudo, os mesmos autores alegam que a hipótese da primeira descarga é polêmica e nem sempre é confirmada por resultados experimentais.

## OBJETIVO

O objetivo principal deste trabalho foi realizar a caracterização qualitativa e quantitativa do escoamento superficial direto (ESD) predial de eventos de chuva reais e investigar a ocorrência de fenômeno de *first flush*, ou primeira descarga, com a elaboração de curvas adimensionais acumuladas da carga mássica de sólidos suspensos totais (SST) e do volume escoado.

## METODOLOGIA

O método de trabalho compreendeu as etapas de monitoramento hidrológico em campo e coletas de amostras do ESD predial de eventos de chuva reais, ensaios laboratoriais para quantificação da carga de sólidos suspensos totais e elaboração de curvas acumuladas adimensionais para análise da distribuição da carga mássica e volume escoado.

A área experimental da pesquisa situa-se no Prédio do Laboratório de Polímeros Biodegradáveis, no campus da Universidade Federal de São Carlos (UFSCar), Campus São Carlos, São Paulo. O ESD analisado provém da ala norte do prédio, composto de 180 m<sup>2</sup> (6 x 30 m) de telhado metálico e 108 m<sup>2</sup> (3,6 x 30 m) de piso de concreto de pátio térreo, totalizando 288 m<sup>2</sup> de área impermeável. Neste prédio são desenvolvidos e confeccionados produtos injetados de polímeros biodegradáveis. Não há presença de vasos de plantas, áreas vegetadas ou solo exposto na área de contribuição.

Contribui para a carga de sólidos carregados a poeira e partículas acumuladas sobre as superfícies nos períodos entre as chuvas. As atividades cotidianas do Laboratório, como o manuseio de *pellets* de polímeros e eventual adição de areia sobre óleo derramado de maquinário, também contribuem para a presença de sólidos no ESD.

As coletas das amostras de ESD predial foram realizadas com o Amostrador Sequencial 6712 F, da empresa Teledyne Isco. Este equipamento foi programado para realizar a coleta sequencial de amostras após a detecção

da presença de água através de um atuador de nível. Uma vez iniciada a coleta, 300 ml de líquido foram armazenados em cada frasco a cada 2 minutos. O atuador de nível e o filtro de sucção foram instalados em uma calha metálica no piso do extremo nordeste do prédio, onde está instalado um vertedor triangular. O atuador de nível foi instalado a 0,5 cm acima da crista do vertedor, enquanto o filtro de sucção ficou na base da calha do vertedor. Foram realizados ensaios para determinação da concentração de sólidos suspensos totais conforme metodologia descrita em *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*.

Anexa a calha metálica, foi instalado sensor de nível da marca Campbell modelo CS455, dentro de uma estrutura de PVC concebida para abrigar o sensor. O sensor foi programado para registrar os níveis de água no interior da calha em intervalos de tempo de 2 minutos. De posse desses dados, as vazões puderam ser calculadas pela Equação (1) de Thompson (Porto, 2001) para vertedores triangulares, que apresenta ajuste de 0,99 às vazões medidas para estas condições de operação segundo Barbassa e Campos (2010).

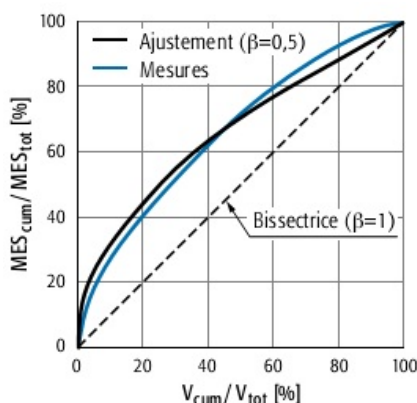
$$Q = 1,4 \cdot h^{\frac{5}{2}} \quad \text{equação (1)}$$

Em que: Q = vazão de água que passa pelo vertedor, em [L]<sup>3</sup>.[T]<sup>-1</sup>; e h = nível de água acima da crista do vertedor, em [L].

Geiger (1984) citado por Baptista et al. (2015), visando facilitar a análise da ocorrência do fenômeno da primeira descarga de poluição propõe a construção de curvas adimensionais acumuladas relacionando a carga de poluente e o volume de escoamento conforme ilustra a figura 1. Desta forma, a ocorrência do efeito de *first flush* nos momentos iniciais do ESD foi investigada através da elaboração de curvas adimensionais acumuladas que relacionam a carga de poluente acumulada, representada pela massa de sólidos suspensos totais, no eixo das ordenadas e o volume de escoamento acumulado no eixo das abscissas. Assim, é possível determinar a proporção da massa de sólidos em função do volume escoado através da relação expressa na equação 2, a seguir.

$$\frac{M_{acum}}{M_{total}} = \left( \frac{V_{acum}}{V_{total}} \right)^{\beta} \longrightarrow M = V^{\beta} \quad \text{equação (2)}$$

Em que: M<sub>acum</sub> = massa acumulada de SST; M<sub>total</sub> = massa total de SST; M = proporção da massa de SST; V<sub>acum</sub> = volume de escoamento acumulado; V<sub>total</sub> = volume total de escoamento; V = proporção do volume de escoamento; e β = coeficiente de ajuste.



**Figura 1 – Curvas ilustrativas adimensionais acumuladas de carga mássica e volume de escoamento**

Fonte: Rossi (2004)

Quanto menor é o valor do coeficiente de ajuste β, mais o efeito de *first flush* é pronunciado. Um valor de β = 1 significa que as concentrações de SST permanecem constantes ao longo do volume escoado e um valor de β > 1 significa que a massa de SST é tardiamente transportada pelo ESD (ROSSI, 2004; FELICE, 2017). Bertrand-Krajewski (1998) e Taebi e Droste (2004) aprofundaram estudos a respeito da topologia da curva adimensional acumulada da carga mássica e volume de escoamento e do coeficiente de ajuste β, nos quais buscaram delimitar diferentes intensidades do *first flush* segundo a tabela 1.

**Tabela 1: Zonas de intensidade de *first flush* de acordo com coeficiente de ajuste  $\beta$**

Valor de $\beta$	Zona	Descrição
$0 \leq \beta \leq 0,185$	1	<i>First flush</i> forte
$0,185 \leq \beta \leq 0,862$	2	<i>First flush</i> moderado
$0,862 \leq \beta \leq 1,00$	3	<i>First flush</i> fraco
$1,00 \leq \beta \leq 1,159$	4	<i>First flush</i> não observado
$1,159 \leq \beta \leq 5,395$	5	<i>First flush</i> não observado com atraso moderado no transporte de massa
$5,395 \leq \beta$	6	<i>First flush</i> não observado com atraso forte no transporte de massa

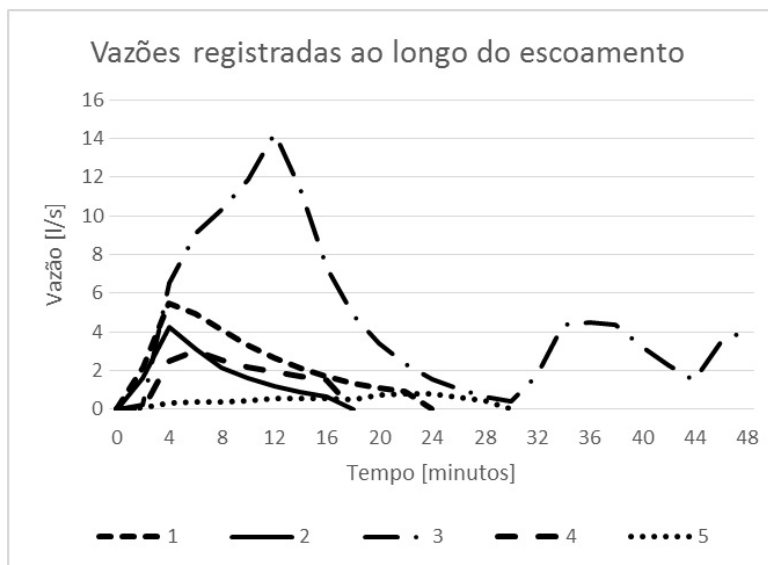
De um modo geral, é possível afirmar que o efeito de *first flush* ocorre quando a curva M-V situa-se sobre a linha de bissetriz (ROSSI, 2004). Entretanto, algumas definições já foram propostas para a determinação concreta do efeito, por exemplo, Saget et. al (1995) estabeleceram a ocorrência do *first flush* se 80% da carga mássica for transportada por até 30% do volume total de escoamento. Nesse mesmo sentido, Wanielista e Yousef (1993) definiram que o efeito ocorre se 50% da carga mássica for transportada por até 25% do volume.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

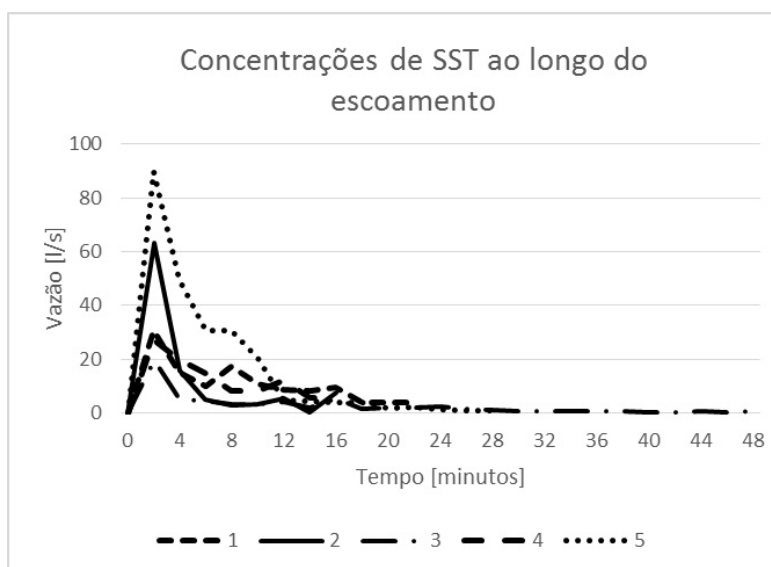
Foram realizadas as coletas de amostras de ESD predial de 5 eventos de chuva, conforme se observam os resultados sintetizados na tabela 2. Na figura 2 é apresentada a variação da vazão registrada ao longo de cada evento, na figura 3 a variação da concentração de SST e na figura 4 são apresentadas as curvas acumuladas adimensionais da carga mássica e do volume escoado.

**Tabela 2 – Características dos eventos amostrados**

Evento	Data	Dias sem chuva	Duração do escoamento (min)	Precipitação efetiva (mm)	Massa total SST (mg)	Volume total de escoamento (L)	Concentração SST (mg/L)		
							média do evento	mínima do evento	máxima do evento
1	08/12/2015	15	22	12,5	45.316	3.596	12,6	4,1	30,1
2	11/02/2016	25	16	6,4	25.025	1.843	13,6	0,3	63,4
3	12/02/2016	0	48	47,9	14.242	13.793	1,0	0,3	19,7
4	22/03/2016	37	16	6,4	20.770	1.840	11,3	5,7	27,1
5	23/03/2016	0	28	3,0	8.114	858	9,5	0,7	89,8



**Figura 2 – Variação da vazão ao longo do tempo de escoamento**

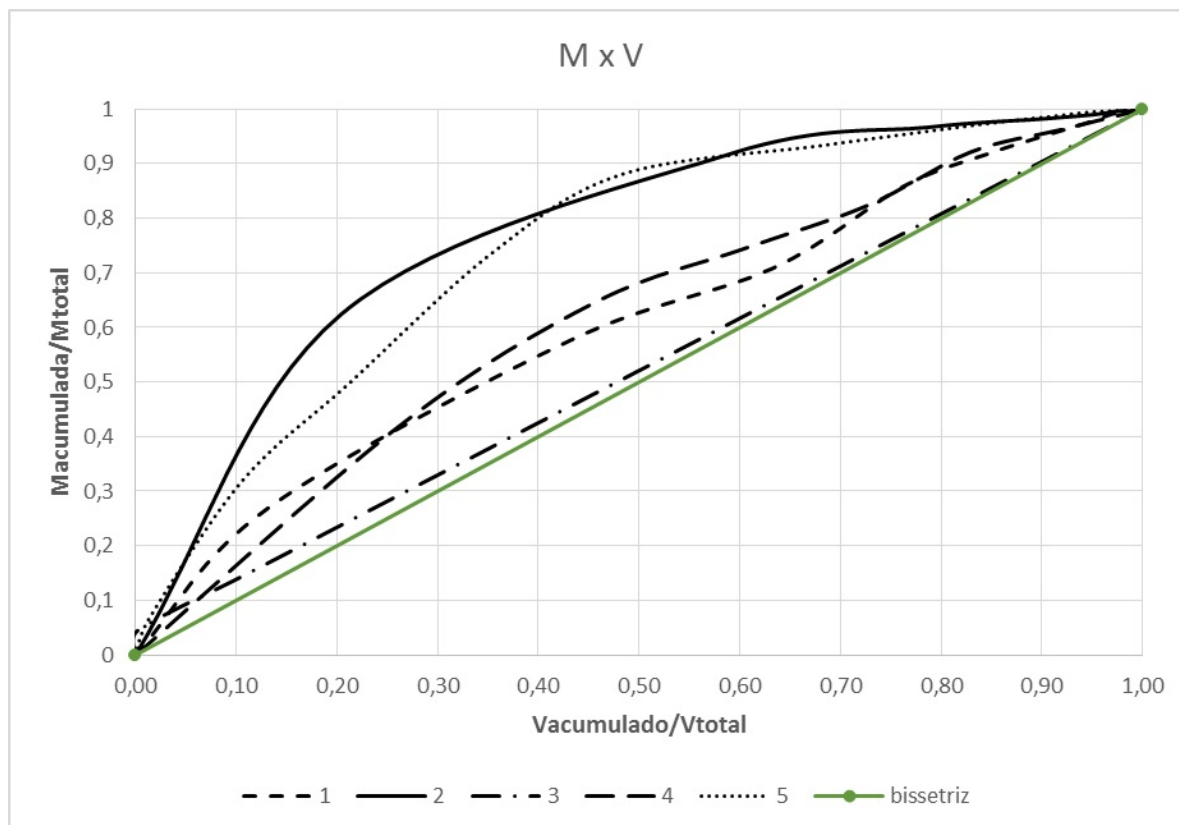


**Figura 3 – Variação da concentração de SST ao longo do tempo de escoamento**

Os dados reunidos na tabela 2 permitem inferir que existe uma relação direta entre a concentração de sólidos presentes no ESD e a quantidade de dias sem chuva que antecede o evento chuvoso, o que é absolutamente esperado, já que as águas de ESD mobilizam e transportam os materiais acumulados na superfície da microbacia hidrográfica durante o período seco que antecede as precipitações.

Contudo, é importante considerar que existem pelo menos outras duas fontes de sólidos no ESD: o material disperso na forma particular na atmosfera que é arrastado pelas gotas da chuva e os depósitos de sedimentos acumulados na rede de drenagem que são colocados em suspensão e transportados pelo escoamento. Esta última fonte é o que justifica, por exemplo, a relativa alta concentração de SST encontrada durante o evento 5 (89,8 mg/l) que não teve dias antecedentes sem chuva.

Um ponto pertinente a se observar é a baixa concentração média de SST do evento 3, que se deve provavelmente ao fato de não haver dia antecedente sem chuva e principalmente pelo alto volume de ESD registrado decorrente da intensa e longa precipitação, conforme observam-se os vários picos na figura 2.



**Figura 4 – Curvas adimensionais acumuladas de carga mássica e volume de escoamento**

Com base das curvas adimensionais acumuladas apresentadas na figura 4 é possível aplicar o critério estabelecido por Bertrand-Krajewski et al. (1995) para verificar a ocorrência do fenômeno de *first flush* nos eventos de chuva analisados. Seguindo a premissa de que o *first flush* ocorre quando pelo menos 80% da massa total de sólidos em suspensão é transportada por até 30% do volume total de escoamento, conclui-se que o fenômeno não foi observado em nenhum dos eventos amostrados. Já no caso da aplicação do critério proposto por Wanielista e Yousef (1993), de que o *first flush* ocorre nos casos em que 25% do volume escoado transporta ao menos 50% da carga mássica, conclui-se que o fenômeno ocorreu nos eventos 2 e 5. Os valores de carga mássica nas frações de volume 25% e 30% dos eventos monitorados são observados na tabela 3.

**Tabela 3 – Porcentagem de carga mássica carregada por fração de volume**

Evento	V 25%	V 30%
1	39,1	44,2
2	65,9	69,7
3	28,2	33,0
4	40,0	46,5
5	56,2	64,6

A partir da relação apresentadas na equação (2) entre massa e volume acumulados adimensionais, foi possível determinar o coeficiente de ajuste  $\beta$  e com base nas zonas propostas por Bertrand-Krajewski (1998) e Taebi e Droste (2004) apresentadas na tabela 1 foi estabelecer a intensidade do efeito de *first flush* nos eventos monitorados, reunidos na tabela 4. Segundo esta determinação, todos os eventos monitorados apresentaram o efeito, o que de acordo com Rossi (2004) já era esperado devido a todos os eventos apresentarem as curvas de distribuição M-V sobre a linha da bissetriz, na figura 4. Apenas o evento 4 situa-se na zona 3, de fraco *first flush*, enquanto os demais eventos situam-se na zona 2 de moderado *first flush*.



**Tabela 4 – Zonas de intensidade de *first flush* dos eventos monitorados**

Evento	$\beta$	zona
1	0,649	2
2	0,28	2
3	0,604	2
4	0,896	3
5	0,567	2

## CONCLUSÕES

Neste trabalho foi realizada a caracterização qualitativa e quantitativa de escoamento superficial direto predial durante 5 eventos de chuva. Para isso, foram realizadas coletas sequenciais de amostras de ESD e analisadas em laboratório as concentrações de sólidos suspensos totais. Também foi realizado o monitoramento da vazão correspondente às amostras coletadas, sendo possível distinguir as frações que compõem o ESD. Foi adotada uma metodologia de elaboração de curvas adimensionais acumuladas da massa de SST relacionada com o volume de escoamento.

Desta forma, foi avaliada a variação do ESD ao longo de sua duração e assim comparada as diferentes parcelas, buscando investigar a ocorrência do efeito de *first flush*, ou seja, a concentração do transporte de material sólido nas frações iniciais do volume escoado. Para tal foram aplicados 3 critérios de determinação, sendo 2 de distribuição da massa carregada pela fração de volume escoado e 1 de análise de coeficiente de ajuste  $\beta$ .

Segundo o critério de carregamento de 80% ou mais da massa de SST nos primeiros 30% do volume total de escoamento, não houve efeito de *first flush*. Segundo o critério de carregamento de 50% ou mais da massa de SST nos primeiros 25% do volume total de escoamento houve efeito de *first flush* em 2 dos eventos monitorados. E segundo o critério da análise de ajuste  $\beta$ , houve efeito de *first flush* nos 5 eventos monitorados, sendo este de intensidade moderada em 4 deles e fraca em outro.

Para trabalhos futuros, sugere-se a continuidade no monitoramento quantitativo e qualitativo de ESD predial gerados por eventos de chuva, a inclusão de novos parâmetros de análise qualitativa, como por exemplo sólidos dissolvidos, e o aprofundamento de comparação entre as diferentes metodologias investigação da ocorrência de *first flush*.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. APHA/AWWA/WEF. EATON, A.D; et al. Standard methods for the examination of water and wastewater. 21ª ed. Washington: American Public Health Association. 1082 p., 2005.
2. BAPTISTA, M.; NASCIMENTO, N.; BARRAUD, S. Técnicas Compensatórias em Drenagem Urbana. 2. Ed. Porto Alegre: ABRH 318 p., 2015.
3. BARBASSA, A. P.; CAMPOS, J. B. N. Comportamento hidrológico de áreas urbanas impermeabilizadas diretamente conectadas e total. Revista Brasileira de Recursos Hídricos (RBRH), Porto Alegre, v. 15, p.69-79, 2010.
4. BERTRAND-KRAJEWSKI, J.L., CHEBBO, G. SAGET, A. La notion de premier flot des rejets urbains de temps de pluie. Paris: Relatório AGHTM, 27p.,1995.
5. BERTRAND-KRAJEWSKI, J.L., CHEBBO, G. SAGET, A. Distribution of pollutant mass vs. volume in stormwater discharges and first-flush phenomenon. Water Research 32(8). p.2341–2356, 1998.
6. FELICE, J. G. Transporte de material em suspensão e dissolvido em modelo físico com superfície impermeável utilizando chuva simulada. Poços de Caldas, 2017. Dissertação de mestrado – Universidade Federal de Alfenas, 2017.
7. GEIGER, W.F. Characteristics of combined sewer runoff. 3<sup>rd</sup> International Conference on Urban Storm Drainage, Göteborg: p. 851-860, 1984.
8. PORTO, R. M. Hidráulica básica. 2. ed. São Carlos: EESC- USP, 2001



9. PRODANOFF, J. H. A. Aplicação de poluição difusa gerada por enxurradas em meio urbano. Rio de Janeiro. 2005. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.
10. RIGHETTO, A.M. Manejo de Águas Pluviais Urbanas. In: PROSAB 5- Manejo de Águas Pluviais Urbanas. Rio de Janeiro: ABES, 2009.
11. ROSSI, L. Modélisation des matières en suspension (MES). GWA Gas, Wasser, Abwasser 10, p.753-761, 2004
12. TAEBI, A., e DROSTE, R.L. First flush pollution load of urban stormwater runoff. Journal of Environmental Engineering and Science, 3(4): 301 -309, 2004
13. TUCCI, C.E.M. Gestão de Águas Pluviais Urbanas – Ministério das Cidades – Global Water Partnership - World Bank – Unesco, 2005.
14. WANIELISTA, M. e YOUSEF, Y. Stormwater Management. John Wiley and Sons, Inc., New York, NY, USA, pp. 579, 1993.