

REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

POTENCIAL DE POLUIÇÃO DIFUSA ORIGINADO PELAS ÁGUAS PLUVIAIS ESCOADAS EM PORÇÃO URBANA DE BACIA HIDROGRÁFICA

José Biscaíno Neto ¹
Gabriel Coimbra Rabelo ¹
Caio Veneno Vendramin ¹
Welliton Leandro de Oliveira Boina ²
* Rosane Freire ¹

POTENTIAL OF DIFFUSE POLLUTION FROM STORM WATER RUNOFF IN URBAN HYDROGRAPHIC BASIN

Recibido el 20 de septiembre de 2018; Aceptado el 30 de abril de 2019

Abstract

In the present work the effect of diffuse water pollution due to urban surface runoff to rivers and streams was analyzed. The highlight is the assessment of the polluting effect in a hydrographic basin. In order to do so, the drainage flow was measured and the drained waters of four different urban surfaces (top of basin, residential, commercial and industrial) were sampled in 15 pluviometric events, considering the duration of precipitation. The analyzes of the results were performed comparing the load values of the studied variables, allowing to discuss the contribution of the flow by the first flush phenomena. The runoff waters of the urban portion presented high pollutant loads in all events, mainly for the total solid parameters and chemical oxygen demand. The values showed that the pollution caused by urban surface runoff in areas with commercial, residential and, above all, industrial influences can contribute greatly to the degradation and reducing the quality of receiving water bodies, affecting all the hydrographic basin.

Keywords: first flush, urban runoff, water pollution.

¹ Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Brasil.

² PPG Engenharia Urbana, Universidade Federal de São Carlos, Brasil.

* *Autor Correspondente:* FCT UNESP, Depto de Química e Bioquímica, Rua Roberto Simonsen, 305, Centro Universitário, Presidente Prudente- SP, CEP 19060-900, Brasil. Email: rosane.freire@unesp.br

Resumo

No presente estudo foi analisado o potencial da poluição hídrica do tipo difusa devido ao encaminhamento das águas de escoamento superficial urbanas para rios e córregos. O destaque está na avaliação do efeito poluidor em uma porção de bacia hidrográfica. Para isso, foram medidas a vazão de escoamento e amostradas as águas escoadas de quatro diferentes superfícies urbanas (topo de bacia, residencial, comercial e industrial) em 15 eventos pluviométricos, considerando a duração da precipitação. As análises dos resultados foram feitas comparando os valores de cargas dos parâmetros estudados, permitindo assim, discutir a contribuição do escoamento pelo fenômeno de primeira carga de lavagem (PCL). As águas de escoamento superficial da porção urbana da bacia hidrográfica apresentaram elevadas cargas poluidoras em todos os eventos, principalmente, para os parâmetros sólidos totais e demanda química de oxigênio. Os valores evidenciaram que a poluição originada pelo escoamento superficial urbano em áreas com influências comerciais, residenciais e, sobretudo, industriais podem contribuir fortemente para a degradação e redução da qualidade dos corpos hídricos receptores, impactando as águas de toda bacia hidrográfica.

Palavras chave: escoamento superficial urbano, poluição da água, primeira carga de lavagem.

Introdução

No caminho da água da chuva rumo ao exutório de uma bacia hidrográfica (BH), a força do escoamento superficial gerada pela precipitação arrasta os mais variados elementos depositados, lavando as vertentes. Esse fenômeno contribui para a alteração das características da água nos corpos receptores e, caso resulte em danos ou prejuízos àqueles que dependem do recurso natural, caracteriza-se como poluição hídrica do tipo difusa. O grande problema da poluição difusa está no fato de não ser possível identificar exatamente a sua origem e sim, uma área de influência. Em uma BH com influência tipicamente urbana, a ocupação das vertentes impermeabiliza as superfícies, reconfigurando o sistema de drenagem natural e direcionando as águas de escoamento para galerias pluviais. São através dessas galerias que escoam as águas de lavagem da superfície urbana sendo encaminhadas, juntamente com todos os poluentes presentes na atmosfera e nas ruas, para os rios e córregos.

Com a preocupação de estudar o efeito poluidor das águas urbanas alguns pesquisadores iniciaram seus trabalhos visando o melhor conhecimento sobre os aspectos de qualidade e disposição das águas que escoam nessas áreas com os eventos de precipitação (Gnecco *et al.*, 2005; Harremoës *et al.*, 1996; Iqbal e Baig, 2015; Lee *et al.*, 2002; Luo *et al.*, 2009; Robien *et al.*, 1997; Xue e Kang, 2012; Wang *et al.*, 2013). Os resultados apresentados concordam quanto ao potencial poluidor decorrente do transporte de material sólido depositado em diferentes superfícies (rodovias, áreas industriais, comerciais, residenciais, etc.), causados pelo *first flush* (primeira carga de lavagem) nos rios e córregos urbanos após um determinado período de estiagem. Qualitativamente, esses estudos apontaram a presença de material orgânico (derivado de combustíveis fósseis e esgotos), sólidos coloidais, metais tóxicos e compostos nitrogenados e fosforados. As pesquisas não somente comprovam a existência de altas concentrações das variáveis analisadas durante os primeiros momentos da precipitação, mas também alertam

quanto a necessidade de ser realizado, com eficiência, a gestão das águas pluviais. Contudo, os estudos realizados não avaliam o efeito poluidor causado pelo escoamento superficial considerando a bacia hidrográfica como um elemento de planejamento e gestão das águas urbanas.

Neste trabalho, a porção urbana de uma BH foi selecionada para avaliação da concentração dos poluentes carreados ao longo do evento pluviométrico formando o “polutograma”, ou seja, a “impressão digital” da área de influência utilizando técnicas simples de medição e de coleta de informações. Outro fator importante na avaliação global do impacto das cargas difusas é a determinação da Concentração Média no Evento – CME. Segundo Prodanoff (2005), a CME, resume em um só valor a relação entre a massa de poluente transportada pelo volume de água escoado, no qual representa a concentração ponderada de um poluente correspondente a um evento completo de enxurrada. O valor da CME pode facilitar, portanto, a comunicação entre a parte técnica e os tomadores de decisão na gestão das águas urbanas.

A existência de estudos iniciais voltados a essa problemática considerando a bacia hidrográfica como unidade de gestão, somada a urgência no desenvolvimento de medidas de controle das águas urbanas motivaram a execução desse trabalho. Logo, o objetivo principal desse estudo foi diagnosticar a poluição de origem difusa das águas de escoamento ao longo do evento pluviométrico, considerando as regiões de ocupação com a influência comercial, industrial, residencial e de topo de bacia hidrográfica de modo a ser possível prever ações futuras de controle locais e específicas na gestão de águas urbanas em BH.

Descrição do local de estudo

No Brasil, as investigações sobre a poluição gerada pela enxurrada em meio urbano se encontram em um estágio inicial e focam seus esforços em Regiões Metropolitanas (RM) (Campana e Bernardes, 2010; Fracalanza e Campos, 2006; Neves e Tucci, 2011; Righetto *et al.*, 2017). Segundo Tucci (2008), essa limitação pode significar que todos os processos inadequados de urbanização e os impactos ambientais que se observam nas RM podem ser reproduzidos nas cidades de médio porte no que tange a gestão das águas pluviais se estudos e medidas de controle não se tornarem importantes no gerenciamento dos deflúvios urbanos dos crescentes polos regionais.

Nesse aspecto, o local em estudo situa-se na porção urbana da bacia hidrográfica do córrego do Limoeiro (BHCL), especificamente sob o domínio do córrego no Veado e Colônia Mineira (Figura 1). A BHCL está localizada no município de Presidente Prudente, um importante polo regional do oeste do Estado de São Paulo, Brasil.

A BHCL possui cotas altimétricas que variam de 487 m a 339 m, e drena uma área de 93.7 km², o que a caracteriza como uma bacia hidrográfica de porte médio. Geologicamente, verifica-se o domínio da Formação Adamantina, pertencente ao Grupo Bauru e, geomorfologicamente,

encontra-se no Planalto Ocidental Paulista (IPT, 1981). Solos predominantes são os Latossolos (topo de bacia hidrográfica), Argissolos e Neossolos (vertentes) e Gleissolos (Planície aluvial) (Fushimi e Nunes, 2012). O clima da região é do tipo “Aw”, com estação chuvosa no verão e seca no inverno e com temperatura do mês mais frio maior que 18 °C, e do mês mais quente superior a 22 °C (Soares, 2012). Quanto aos aspectos de vegetação, a região encontra-se no Bioma Mata Atlântica (IBGE, 2004). A rede hidrográfica urbana é formada principalmente pelos córregos Colônia Mineira, Bacarin, Córrego do Veado, Guaiuvira, Saltinho e Córrego do Limoeiro.

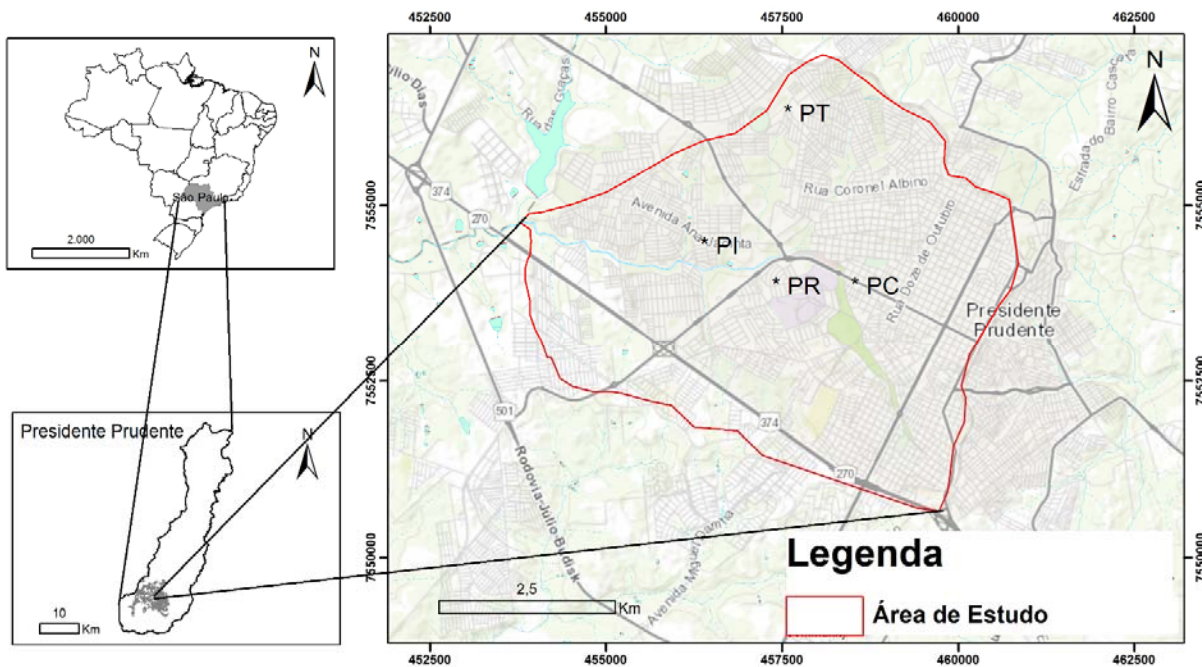


Figura 1. Área de estudo e alocação dos pontos amostrais.

O tipo de uso da terra na BHCL é caracterizado por área urbana ocupando 36.3% da área, e periurbana (55.2%), dessa forma, a maior parte dos cursos d’água é afetada pela antropização (Rabelo *et al.*, 2015). O estudo aponta ausência de mata ciliar (presente em apenas 6,8% da área) e a presença de solo exposto (em 1.7% da área) em torno dos córregos urbanos, fator esse que pode provocar o excesso de sedimentos nas águas.

Metodologia

As fontes difusas de poluição de origem urbana na BHCL são alvo de investigação do presente trabalho. Foram selecionados quatro pontos de amostragem qualitativa e quantitativa de água de escoamento superficial (Figura 1) considerando as potenciais fontes de poluição bem como o

aspecto de acessibilidade, linearidade do trecho de escoamento, ausência de obstáculos, bueiros, fossas, bacias de contenção e proximidade das regiões de influência de cabeceira de bacia hidrográfica (PT), residencial (PR), comercial (PC), industrial (PI) (Quadro 1).

Quadro 1. Características da região de influência dos pontos de monitoramento. A) PT; B) PR; C) PC; D) PI

Cabeceira (Topo) de BH – PT

R. João Antônio Seabra. Predomínio de pastagens, gramíneas e solo exposto. Baixo fluxo de veículos na via. Presença esporádica de animais de grande porte (cavalos, p.e.). Escoamento no sentido oposto ao trânsito da via. Inclinação média: 0.03. Área de influência: 0.01km². Cota altimétrica de coleta de dados: 458m.



A)

Residencial – PR

R. José Levy Guedes. Predomínio de residências de médio padrão. Fluxo de veículos (carros e motos) intensificado no período da manhã e final da tarde. Pouca presença de árvores nas calçadas. Escoamento no sentido oposto ao trânsito da via. Inclinação média: 0.02. Área de influência: 0.03km². Cota altimétrica de coleta de dados: 413m.



B)

Comercial – PC

Avenida Manoel Goulart. Área com comércios diversos: restaurantes, lojas de material de construção, lojas de móveis, aluguel de carros, e etc. Intenso fluxo de carros, motos, ônibus e caminhões. Ausência de árvores. Escoamento no sentido oposto ao trânsito da via. Inclinação média: 0.04. Área de influência: 0.01km². Cota altimétrica de coleta de dados: 421m.



C)

Industrial – PI

Avenida Ana Jacinta. Influência direta de um frigorífico e um curtume. Intenso fluxo de carros, motos, ônibus e caminhões. Presença de árvores à margem (no interior das indústrias). Escoamento no sentido oposto ao trânsito da via. Área de influência: 0.01km². Cota altimétrica de coleta de dados: 403m.



D)

O período de amostragem ocorreu no ano de 2015 (novembro) e ao longo de 2016 (janeiro, março, abril, maio, julho, agosto e setembro), totalizando 15 eventos pluviométricos. Nos pontos amostrais foi realizado o monitoramento quantitativo e qualitativo das águas de escoamento superficial considerando o efeito da precipitação ocorrida e o efeito dos dias sem chuvas (DSC), observando o grau de dependência entre as variáveis por medida de correlação linear.

Para determinação da vazão de escoamento, foi utilizado um método simples e empregado em sistemas de canais abertos: o produto da velocidade média de escoamento superficial com a área da seção transversal ao escoamento. Assim, foi possível considerar a contribuição específica ao ponto amostral, incluir a distribuição da chuva ao longo de toda sua duração e o efeito da variação de intensidade de precipitação no escoamento, além das perdas por infiltração no solo e evapotranspiração. A vazão determinada pelo método dos canais abertos é significativa para a proposta, pois elimina o efeito de drenagem urbana e permite a relação direta e real do valor de concentração dos poluentes escoados no exato momento da chuva com a determinação da carga escoada real.

A velocidade média de escoamento foi determinada pelo método do flutuador, empregando objetos de baixa densidade (galhos, folhas, etc), determinando-se o tempo gasto para o flutuador percorrer uma distância conhecida, conforme definido por Palhares *et al.* (2007). Nesse estudo, foi adotado uma esfera de isopor (poliestireno) como objeto flutuador, sendo este recolhido após percorrer a distância de 2 m. A área da seção transversal de escoamento foi estimada no canal de passagem da água de escoamento (sarjeta), mensurando, por meio de uma trena, a altura da lâmina d'água e a largura do escoamento superficial, seguindo as recomendações de Azevedo Neto (1998), Gribbin (2014) e Campana e Bernardes (2010). Devido a irregularidades geométrica das sarjetas, por aproximação, foi adotada uma área de seção triangular. As aferições foram realizadas na porção da menor cota altimétrica da área de influência do ponto, no sentido do fluxo do escoamento. Na presença de bueiros nas vias, a medida era realizada em porção montante do mesmo.

A amostragem das águas de escoamento superficial para as análises qualitativas foi definida em intervalos de tempo preestabelecidos, considerando a duração total da precipitação, conforme a metodologia descrita em Luo *et al.* (2009), com coleta a cada 5 minutos durante um evento pluviométrico de até 30 minutos. As amostras coletadas foram por amostragem simples, na porção central do canal de escoamento, sendo as amostras armazenadas em garrafas de Politereftalato de Etileno (PET), com capacidade de 1 L, as quais foram limpas previamente, conforme APHA (1998), e acondicionados em uma caixa de isopor com gelo para transporte. Os parâmetros qualitativos analisados foram: Demanda Química de Oxigênio (DQO), Sólidos Totais (ST), Fósforo Total (FT) e Nitrato (NO₃) (Tabela 1).

Tabela 1. Descrição dos métodos e referências utilizadas na determinação dos parâmetros qualitativos

Parâmetro	Método	Unidade	Referência
DQO	Digestão fechada – colorimétrico	mg/L	APHA (1998)
ST	Gravimétrico	mg/L	APHA (1998)
FT	Digestão ácida com persulfato de potássio	mg/L	Silva e Oliveira (2001)
NO ₃	Ácido fenoldissulfônico	mg/L	ABNT NBR 12620/1992

Os dados obtidos foram analisados considerando a variação da qualidade da água escoada ao longo do deflúvio, formando o polutograma. A elaboração do polutograma foi realizada por meio de representações gráficas da carga dos poluentes monitorados em função do deflúvio formado pelas águas de escoamento superficial, ou seja, representado pela variação da carga ou concentração poluente no intervalo de tempo em que ocorreu a precipitação.

A avaliação global das cargas pelo escoamento superficial foi realizada por meio do cálculo da concentração média no evento – CME (Equação 1). A CME resume em um só valor a relação entre a massa de poluente transportada pelo volume de água escoado (ou vazão de escoamento), no qual representa a concentração ponderada de um poluente correspondente a um evento completo de enxurrada (Prodanoff, 2005).

$$CME = \frac{M}{V} = \frac{\int_0^t C_t Q_t dt}{\int_0^t Q_t dt} \approx \frac{\sum C_t Q_t dt}{\sum Q_t dt} \quad \text{(Equação 1)}$$

em que:

CME é a concentração média do evento (mg/L);

V é o volume total do escoamento superficial (m³);

M é a massa do poluente (g);

Δt é o intervalo de tempo (min);

Q_t é a quantidade de água da chuva escoada durante o intervalo de tempo (m³/min);

C_t é a concentração do poluente durante o intervalo de tempo (mg/L).

Foi elaborado a curva massa (M) por volume (V), conforme apresentado em Righetto *et al.* (2017). A curva M x V traduz a relação entre a fração de massa de poluente removida com a fração de volume escoado, sendo possível então, determinar a ocorrência de *first flush*, também denominado primeira carga de lavagem (PCL).

Dados de precipitação pluviométrica e dos dias sem chuvas (DSC) do período de monitoramento foram fornecidos pela Estação Meteorológica da Faculdade de Ciências e Tecnologia (FCT/UNESP). A Estação está localizada na área de estudo e possui pluviômetro automático para registro de precipitação horária.

Resultados e discussão

Na Tabela 2 é apresentado o potencial poluidor do escoamento por ponto de coleta de cada evento pluviométrico monitorado na BHCL partindo da concentração média do evento (CME) dos parâmetros analisados, da precipitação pluviométrica registrada (PPt) e dos dias sem chuva (DSC).

Em uma análise geral, as maiores variações entre os eventos foram observadas para as variáveis FT em PC e ST em PT, com coeficiente de variação (CV) de 5.7 e 5.0, respectivamente. As menores variações foram registradas em PI, indicando uniformidade dos dados. Entretanto, destaca-se os valores obtidos para os parâmetros NO₃ no ponto PC (CV=0.9) e FT (CV = 0.8) em PT.

Tabela 2. Concentração Média do Evento (CME) dos parâmetros monitorados

Data	PPt (mm)	DSC (d)	CME (mg/L)				Data	PPt (mm)	DSC (d)	CME (mg/L)			
			DQO	ST	FT	NO ₃				DQO	ST	FT	NO ₃
							PT						
24/11/2015	32.8	0.7	167.1	163.3	18.4	-	15/11/2015	32.2	6.0	90.2	220.9	3.3	-
26/04/2016	87.2	0.1	85.7	131.9	3.2	2.2	09/03/2016	2.2	2.0	254.9	198.6	2.5	3.9
16/07/2016	16.8	9.1	84.5	109.3	1.2	2.4	25/03/2016	20.6	0.1	47.2	69.6	2.2	0.7
							20/08/2016	43.0	0.4	39.2	46.7	2.7	0.5
Média	45.6	3.3	112.4	134.8	7.6	2.3	Média	24.5	2.1	107.9	134.0	2.7	1.7
Mediana	32.8	0.7	85.7	131.9	3.2	2.3	Mediana	26.4	1.2	68.7	134.1	2.6	0.7
DP	36.9	5.0	47.3	27.1	9.4	0.1	DP	17.5	2.7	100.6	88.5	0.5	1.9
Maior	87.2	9.1	167.1	163.3	18.4	2.4	Maior	43.0	6.0	254.9	220.9	3.3	3.9
Menor	16.8	0.1	84.5	109.3	1.2	2.2	Menor	2.2	0.1	39.2	46.7	2.2	0.5
CV	0.8	1.5	2.4	5.0	0.8	16.3	CV	0.7	1.3	1.1	1.5	5.7	0.9
							PC						
08/11/2015	2.4	3.5	146.8	247.7	7.0	-	17/11/2015	21.2	0.6	159.0	406.7	53.4	0.0
09/01/2016	33.3	0.2	127.3	154.1	2.9	2.7	27/01/2016	27.4	0.5	240.4	531.2	19.9	2.9
25/04/2016	3.2	31.0	297.1	261.9	5.9	3.4	20/05/2016	7.0	1.7	713.8	1834.7	21.2	8.3
07/07/2016	0.2	30.2	90.3	165.1	2.9	6.7	04/09/2016	10.8	0.1	344.3	1978.3	17.9	8.1
Média	9.8	16.2	165.4	207.2	4.7	4.2	Média	16.6	0.7	364.4	1187.7	28.1	4.8
Mediana	2.8	16.9	137.1	206.4	4.4	3.4	Mediana	16.0	0.5	292.3	1183.0	20.5	5.5
DP	15.8	16.6	90.9	55.4	2.1	2.1	DP	9.4	0.7	245.0	833.6	16.9	4.1
Maior	33.3	31.0	297.1	261.9	7.0	6.7	Maior	27.4	1.7	713.8	1978.3	53.4	8.3
Menor	0.2	30.2	90.3	154.1	2.9	2.7	Menor	7.0	0.1	159.0	406.7	17.9	2.9
CV	1.6	1.0	1.8	3.7	2.2	2.0	CV	0.6	1.0	1.5	1.4	1.7	1.2
							PI						

*DP: Desvio Padrão. CV: Coeficiente de Variação. (-): Não Registrado.

Efeito dos dias sem chuva (DSC)

Conforme Righetto *et al.* (2017), um maior número de dias sem chuva (DSC) pode resultar em maior concentração de poluentes sobre as superfícies. Assim, o presente estudo foi caracterizado por baixo intervalo de dias sem chuvas (DSC) nos pontos em investigação. O maior intervalo entre os eventos pluviométricos ocorreu no domínio residencial (PR), com 31 dias, e o menor (0.1 dias) em PT, PC e PI.

Para analisar o efeito da deposição de poluentes nas superfícies estudadas com o tempo, realizou-se uma análise de correlação entre os valores de CME dos parâmetros analisados e os valores de DSC. Os resultados mostraram uma relação inversamente proporcional em PT, com significância estatística para ST ($r = -0.78$; $p = 0.05$), indicando que o aumento de DSC implica em menor deposição de material sólido sobre esse local. Ainda, a análise de regressão linear mostrou que 60% da variação da concentração de ST pode ser explicada pela variação dos valores de DSC ($r = 0.60$). Isso indica que se trata de uma área protegida para as fontes de sedimentos, mas não isenta de algum efeito sobre precipitações de alta intensidade que permitiriam uma maior desagregação de partículas sólidas ao longo do tempo. Em geral, PT obteve os menores valores de concentração de ST registrados durante o período de monitoramento em relação aos pontos PR e PI ($CME_{MédiaPT} = 134.8$ mg/L).

Nos pontos PC e PI, a relação entre o DSC e as concentrações dos parâmetros analisados foi diretamente proporcional, indicando acúmulo de material ao longo do tempo. Em PC, houve significância estatística para as variáveis ST ($r = 0.85$; $p = 0.05$), FT ($r = 0.87$; $p = 0.05$) e NO_3 ($r = 0.98$; $p = 0.05$). A regressão linear mostrou que mais de 70% das variações das concentrações dos poluentes nesse ponto podem ser explicadas pela variável DSC. Em relação a PI, apenas a variável DQO mostrou significância ($r = 0.81$) em relação a DSC. Como se trata de um ponto localizado em uma região de domínio industrial, com grande fluxo de automóveis e de insumos para o processo produtivo, o acúmulo de materiais orgânicos e inorgânicos ao longo do tempo mostrou-se importante. A regressão linear apontou que 65% da variação da DQO são explicadas pela variação de DSC nesse ponto.

First flush e polutogramas das regiões de influência na BH

Segundo Righetto *et al.* (2017), considera-se a ocorrência de *first flush*, ou PCL, quando a curva de fração massa removida e pela fração de volume escoado do evento pluviométrico estudado estiver acima do bissetor do gráfico. Logo, dos 15 eventos monitorados apenas em 5 não foram identificados a ocorrência da primeira carga de lavagem (PCL) para algum parâmetro de qualidade estudado.

Em PT, localizado em região de topo de BH, apenas não foi observado o *first flush* para o parâmetro nitrato (NO_3) no evento de 26/04/2016. De fato, foi registrado um transporte pouco

expressivo de nitrato nesse ponto ($CME_{Média} = 2.3 \text{ mg/L}$) nos eventos acompanhados em relação as demais regiões estudadas. Como esse parâmetro está relacionado a fração sólida dissolvida e ionizável, provavelmente, a intensidade da precipitação desse evento não foi suficiente para o desprendimento e arraste dessas partículas sobre a superfície.

Em relação a carga transportada, em geral destacam-se os valores de CME obtidos para as variáveis ST (máx. = 163.3 mg/L; mín. = 109.3 mg/L) e DQO (máx. = 167.1 mg/L; mín. = 84.5 mg/L), com proporção de remoção de massa nos primeiros 30% de volume escoado (Ferreira, 2008) de 40 e 44%, respectivamente, no evento de 24/11/2015 (Figura 2a e 2b).

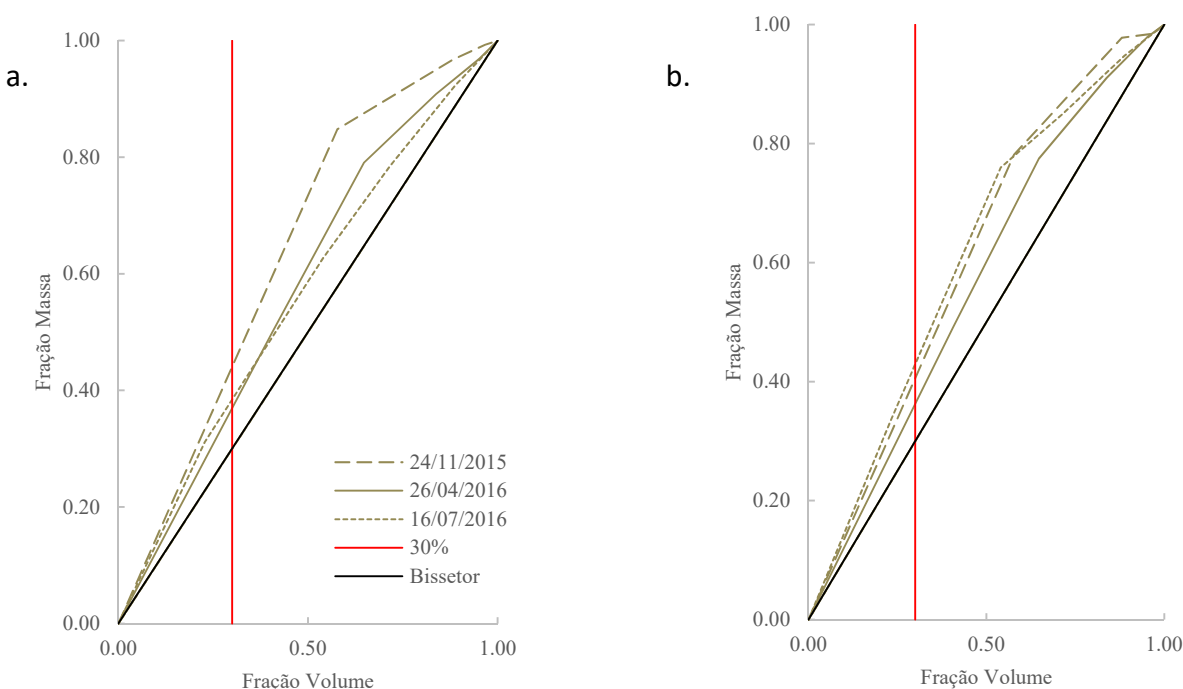


Figura 2. Curva fração massa e fração volume para os parâmetros DQO (a) e ST (b) no ponto PT.

Por fim, destacam-se os valores encontrados de CME para FT (máx. = 18.4 mg/L; mín. = 1.2 mg/L) que, nesse caso, podem estar associados a situações externas a região de topo de bacia. Apesar de possuir baixa densidade populacional, é provável que houve a interferência de produtos fosfatados (sabões/detergentes/desinfetantes/herbicidas) utilizados pelos moradores das residências na limpeza de calçadas ou controle de ervas daninhas, sendo esses transportados rapidamente pelo escoamento até o ponto de amostragem.

Os polutogramas dos eventos mostraram que os dez primeiros minutos do deflúvio é capaz de transportar mais de 90% da carga de poluente depositada na superfície (Figura 3). A área circundante ao PT é caracterizada por apresentar gramíneas, pouco solo exposto, com densidade populacional baixa, logo, como previsto em literatura (Campana e Bernardes, 2010; Lee e Bang, 2000; Tucci, 2005; Zhang *et al.* 2010), era esperado pouco material depositado e grande fluxo de escoamento superficial.

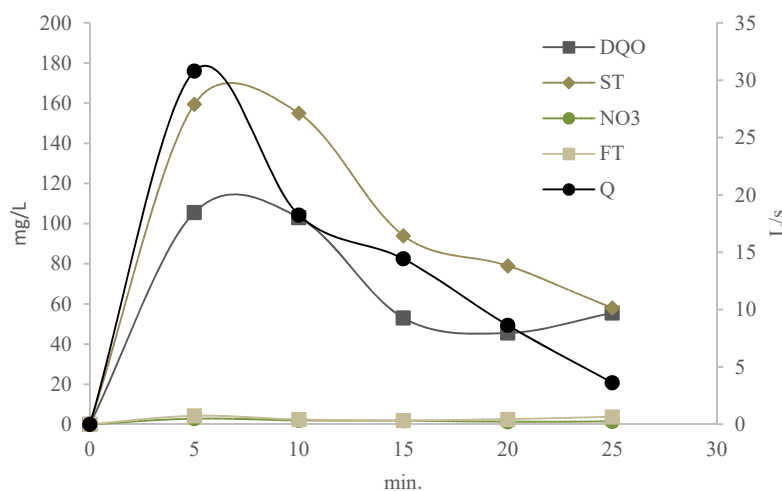


Figura 3. Polutograma do evento de precipitação registrado em 26/04/2016 no ponto PT.

No ponto PR, localizado em região de vertente de bacia, predominantemente residencial com alta taxa de ocupação, houve a ocorrência do *first flush* em todos os eventos pluviométricos monitorados, com remoção de mais 48% do material depositado nos primeiros 30% de volume escoado no evento de 09/01/2016. O polutograma registrou elevados valores de vazão nesse evento, com grande transporte de material depositado nas superfícies pelo escoamento superficial. Em relação a CME, também se destacam os valores obtidos para os parâmetros DQO (máx. = 297.1 mg/L; mín. = 90.3 mg/L) e ST (máx. = 261.9 mg/L; mín. = 154.1 mg/L) (Figura 4a e 4b, respectivamente)

Os resultados aqui apresentados concordam com os valores encontrados em estudos realizados em áreas residenciais de alta densidade dos grandes centros urbanos (Lee e Bang, 2000). Contudo, destaca-se que o hábito da limpeza (varrição e lavagem) das calçadas e sarjetas pelos moradores pode ter interferido nos resultados apresentados, sendo possível encontrar valores muito superiores de concentração de poluentes se essa prática não fosse realizada.

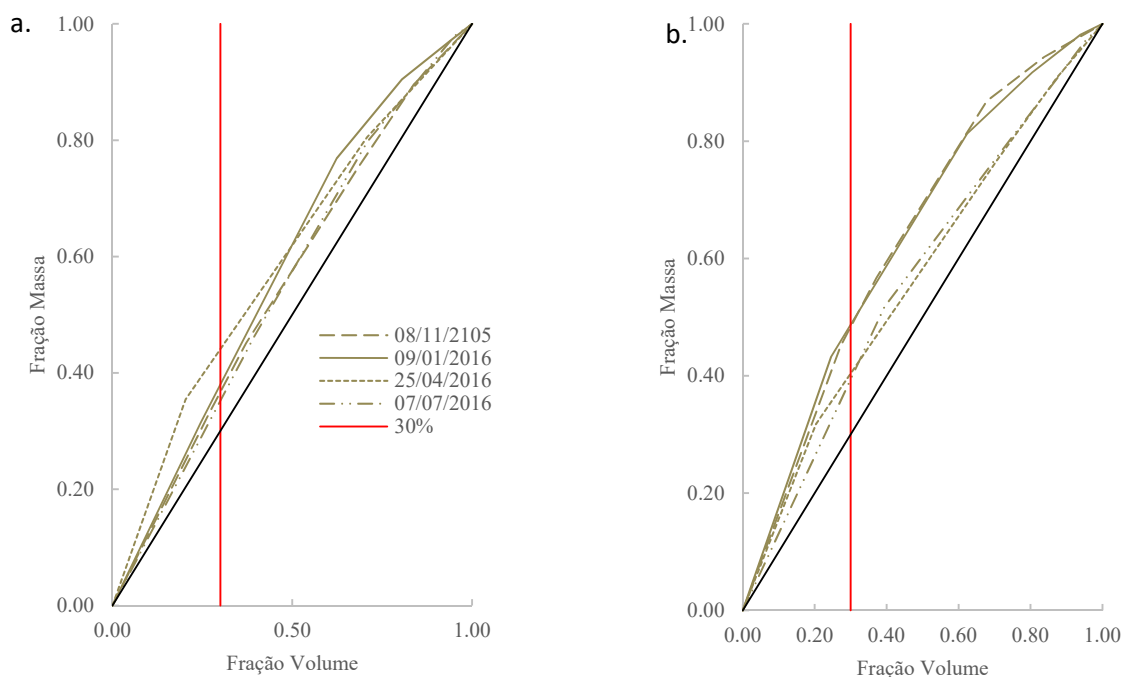


Figura 4. Curva fração massa e fração volume para os parâmetros DQO (a), ST (b), FT (c) e NO_3 (d) no ponto PR.

Na região sobre o domínio comercial (PC), não foi observado o efeito do *first flush* para o parâmetro ST no evento de 15/11/2015. Analisando os resultados apresentados na Tabela 2, observa-se que a região de domínio comercial (PC) apresentou os menores valores médios de CME para os parâmetros monitorados (DQO = 107.9 mg/L; ST = 134.0 mg/L; FT = 2.7 mg/L; NO_3 = 1.7mg/L). Esse fenômeno foi observado por Lucke *et al.* (2018) no qual pode ser explicado pela grande impermeabilização do solo, existência valetas ou lombadas para redução da velocidade dos automóveis (atuando como redutores do escoamento e depósito de materiais carreados), grande circulação de carros, práticas de limpeza de calçadas adotadas pelos comerciantes/prefeitura municipal e existência de pouca vegetação na região do ponto de monitoramento.

Em PC, a um volume de escoamento acumulado de 30%, houve a máxima remoção de material depositado na proporção de 40% da DQO no evento de 15/11/2015; 36% de ST no evento de 09/03/2016; 42% de FT e 38 % de NO_3 no evento de 25/03/2016. Nas áreas com influência comercial, a duração da precipitação se mostra importante para o arraste dos materiais, especialmente ST (Figura 5). Os polutogramas também mostram que, em média, 70% do material depositado são transportados nos primeiros 10 minutos de precipitação.

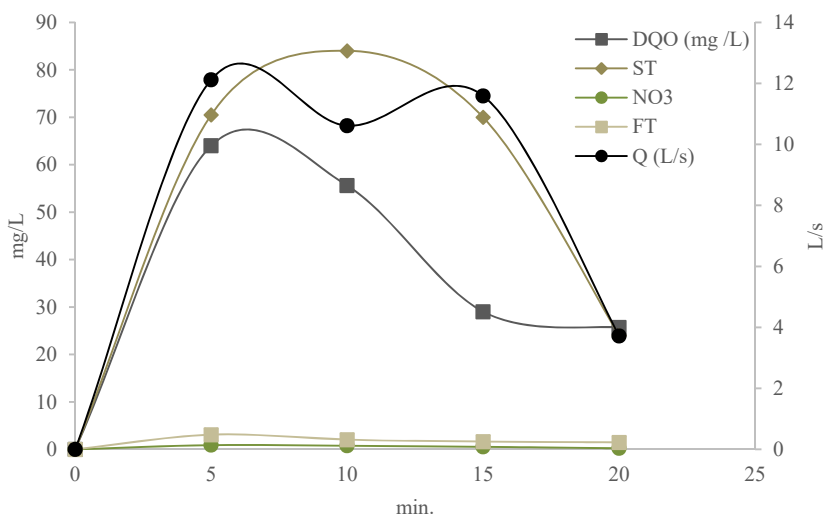


Figura 5. Polutograma do evento 25/03/2016 no ponto PC.

Para a carga transportada em PI, região de domínio industrial com presença de dois frigoríficos e um curtume, foram observados os maiores valores de concentração para todos parâmetros monitorados: DQO (máx. = 713.8 mg/L; mín. = 159.0 mg/L), ST (máx. = 1978.3 mg/L; mín. = 406.7 mg/L), FT (máx. = 53.4 mg/L; mín. = 1.9 mg/L) e NO₃ (máx. = 8.3 mg/L; mín. = 2.9 mg/L). A proporção de remoção de massa nos primeiros 30% de volume escoado foi de 49% de DQO e 54% de ST, no evento de 20/05/2016 (Figura 6a e 6b).

Altos valores de concentração em áreas industriais são reportados em vários estudos realizados em regiões metropolitanas (RM) do país e do mundo. A presença de material sólido em abundância no escoamento deve ser entendida como um indicativo da presença de outros poluentes, visto que, esses materiais agem como um substrato de transporte. Entretanto, é necessário destacar que os valores aqui apresentados para os parâmetros monitorados são próximos ou até mesmo superiores a aqueles registrados em estudos realizados em Shenzhen, China (Luo *et al.*, 2009), em Zhengzhou City, China (Zhang *et al.*, 2009), Taejon and Chongju, Coreia (Lee e Bang, 2000). Essa situação, vem ao encontro da problemática apresentada por Tucci (2008) no qual problemas ambientais das grandes cidades (RM) são reproduzidos em polos de desenvolvimento regional devido ao tipo de uso que se faz da terra. Neste caso, afetando diretamente a qualidade das águas dos rios e córregos urbanos da BHCL.

O polutograma do evento pluviométrico de 20/05/2016 registrou o efeito de lavagem em PI mostrando elevada concentração de materiais e baixa vazão de escoamento. Os primeiros 5 minutos de precipitação são suficientes para o transporte de 50% da carga de ST.

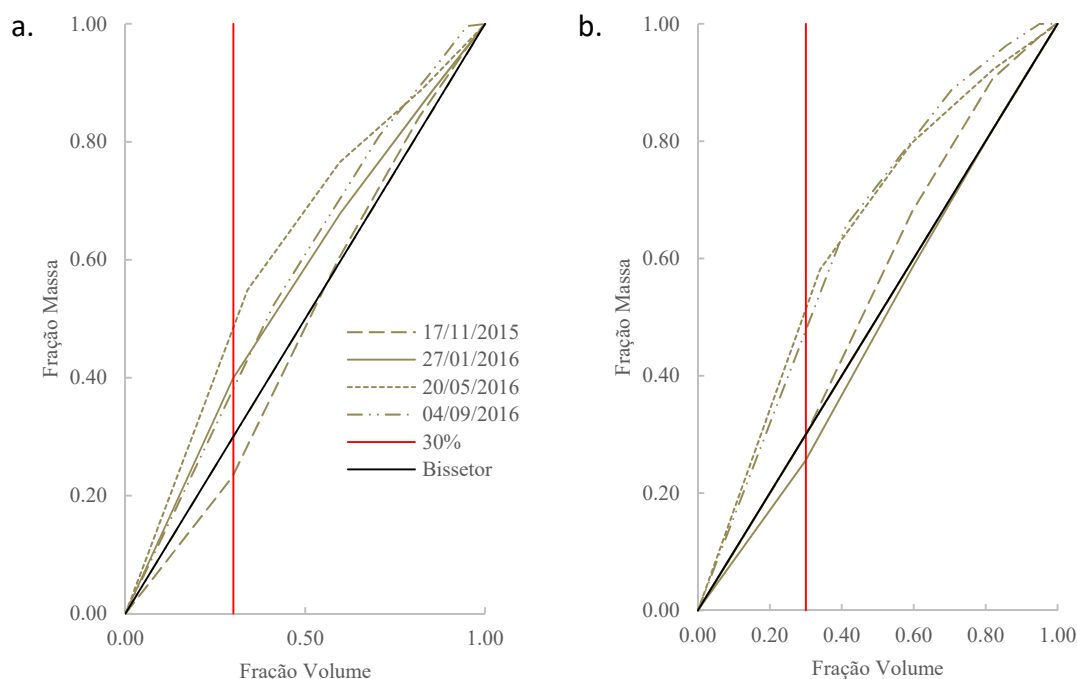


Figura 6. Curva fração massa e fração volume para os parâmetros DQO (a) e ST (b) no ponto PI.

Diagnóstico e proposta de controle da poluição difusa em bacia hidrográfica

O presente estudo foi o primeiro realizado na BHCL com a perspectiva de conhecer as cargas de escoamento superficial urbano e, apesar de utilizar técnicas simples de medição e coleta de dados, os resultados gerados são importantes, pois fornece subsídios para que outros trabalhos possam ser desenvolvidos na busca de solucionar os problemas existentes e emergentes, quanto a gestão das águas urbanas em bacias hidrográficas.

Considerando a resposta rápida ao deflúvio frente aos eventos de precipitação (10 minutos), entre as boas práticas de manejo das águas pluviais (*Best Management Practices - BMP*) é incentivado promover ou maximizar a infiltração em toda bacia hidrográfica, impedindo ou minimizando o carreamento de material. Entre as ações com resultados satisfatórios, ressalta-se o uso de pavimento modular (Alessi *et al.*, 2006), faixas gramadas (Tomaz, 2006) e lagoas de infiltração (Ribeiro, 2014).

Diante dos resultados do monitoramento realizado na porção urbana da BHCL, somado a vivência e constatações *in loco*, ficou claro que há a necessidade de uma atenção especial na gestão das cargas difusas na região industrial, onde a carga sólida orgânica e inorgânica transportada foi

superior às demais áreas monitoradas. Nessas regiões, a melhor maneira de evitar a poluição das águas pluviais é minimizar as oportunidades para que as águas pluviais entrem em contato com atividades industriais e materiais poluentes. Ou seja, cabe a cada indústria adotar ações internas para minimização da poluição.

Conclusão

No presente estudo pode-se concluir que a qualidade da água do escoamento superficial analisada foi diretamente influenciada pela forma de uso e ocupação presente na porção urbana da BH. Os valores das variáveis monitoradas evidenciaram que a poluição originada do escoamento superficial urbano em áreas com influências residenciais, comerciais e, principalmente, industriais contribuem para a degradação e redução da qualidade dos corpos hídricos receptores, sobretudo em relação ao aporte de cargas no regime de primeira carga de lavagem. Diante dos resultados do monitoramento, ficou claro que a área industrial necessita de uma atenção especial. Para isso, dentre as medidas de controle propostas destaca-se a maximização da infiltração das águas pluviais e melhorias no manejo de produto do processo produtivo.

Referências

- ABNT, Associação Brasileira de Normas Técnicas (1992) *NBR 12620/1992 Águas – Determinação de nitrato – Método do ácido cromotrópico e do ácido fenoldissulfônico*. ABNT, 26 de novembro de 1992. Acesso em 18 de janeiro de 2018, disponível em: www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=2750
- Alessi, F., Kokot, P. J., Gomes, J. (2006) Comparação do escoamento superficial gerado por pavimentos permeáveis em blocos de concreto e asfalto poroso. *Da Vinci. Curitiba*, **3** (1), 139-156. Acesso em 12 de novembro de 2017, disponível em: https://www.up.edu.br/davinci/3/310_comparacao_do_escoamento_superficial.pdf
- APHA. American Public Health Association. (1998) *Standard methods for the examination of water and wastewater*. Washington, D.C, 1600 pp.
- Azevedo Neto, J. M. (1998) *Manual de hidráulica*, Edgar Blucher, São Paulo, 669 pp.
- Campana, N. A., Bernardes, R. S. (2010) Qualidade do escoamento na rede de drenagem pluvial urbana: a situação de Brasília-DF. *Revista de Gestão de Águas da América Latina*, **7**(2), 53-65. doi: <http://dx.doi.org/10.21168/rega.v7n2.p53-65>
- Fracalanza, A. P. Campos, V. N.O. (2006) Produção social do Espaço Urbano e conflitos pela água na Região Metropolitana de São Paulo. *Revista São Paulo em Perspectiva*, **20**(2), 32-45. Acesso em 24 de maio de 2016, disponível em: <https://pdfs.semanticscholar.org/338b/a906b8f03af13bbcc110b8f5e22409c50c9a.pdf>
- Ferreira, L. C. A. (2008) *Variação da qualidade da água do escoamento superficial de duas bacias de drenagem de Natal/RN – Brasil*, Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária), Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 100 pp.
- Fushimi, M., Nunes, J. O. R. (2012) Principais classes de solos do município de Presidente Prudente – SP: identificação e caracterização. *Boletim Goiano de Geografia*, **32**(1), 45-58. doi: <https://doi.org/10.5216/bgg.v32i1.18955>
- Gnecco, I., Berretta, C., Lanza, L. G., La Barbera, P. (2005) Storm water pollution in the urban environment of Genoa, Italy, *Atmospheric Research*, **77**(1), 60-73. doi: <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2004.10.017>
- Gribbin, J. E. (2014) *Introdução a hidráulica, hidrologia e gestão de águas pluviais*, Cengage Learning, 526 pp.

- Harremoës, P., Napstjert, L., Rye C., Larsen, H. O., Dahl, A. (1996) Impact of rain runoff on oxygen in an urban river. *Water Science and Technology*, **34**(12), 41–48. doi: [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(96\)00852-9](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(96)00852-9) [Get rights and content](#)
- IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (2004) *Geociências. Informações Ambientais*. Acesso em 16 mai. 2015, disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/cartas-e-mapas/informacoes-ambientais.html>
- IPT. Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (1981). *Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo: 1:1.000.000*, vol. II, IPT, São Paulo.
- Iqbal, H., Baig, A. M. (2015) Characterization of first flush in urban highway runoffs. *Environmental Engineering & Management Journal*, **14**(1), 45-50. doi:<https://doi.org/10.30638/eemj.2015.006>
- Lee, J. H., Bang, K. W., Ketchum, L. H., Choe, J. S., Yu, M. J. (2002) First flush analysis of urban storm runoff. *The Science of the Total Environment*, **293**(1) 163-175. doi: [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(02\)00006-2](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(02)00006-2)
- Lee, J. H., Bang, K. W. (2000) Characterization of urban stormwater runoff, *Water Research*, **34**(6), 1773 – 1780. Acesso em 29 de novembro de 2017, disponível em [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(99\)00325-5](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(99)00325-5)
- Lucke, T., Drapper, D., Hornbuckle, A. (2018) Urban stormwater characterization and nitrogen composition from lot-scale catchments – New management implications. *Science of the Total Environment*, **619-629**(1), 65-71. Acesso em 20 de janeiro de 2018, disponível em <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.105>
- Luo, H., Luo, L., Huang, G.; Liu, P., Li, J., Hu, S.; Wang, F.; Xu, R.; Huang, X. (2009) Total pollution effect of urban surface runoff. *Journal of Environmental Sciences*, **21**(1), 1186-1193. Acesso em 20 de janeiro de 2018, disponível em: [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(08\)62402-X](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(08)62402-X)
- Neves, M. G. F. P., Tucci, A. E. M. (2011) Composição de resíduos de varrição e resíduos carreados pela rede de drenagem, em uma bacia hidrográfica urbana. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, **16**(4), 331-336. Acesso em 20 de janeiro de 2016, disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-41522011000400003>
- Palhares, J. C. P., Ramos, C., Klein, J. B., Lima, J. M. M., Muller, S., Cestonaro, T. (2007) *Medição da Vazão em Rios pelo Método do Flutuador*. EMBRAPA, Comunicado Técnico 455, Concórdia – SC, 4 pp. Acesso em 25 de março de 2014, disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/443939/medicao-da-vazao-em-rios-pelo-metodo-do-flutuador>
- Prodanoff, J. H. A. *Avaliação da poluição difusa gerada por enxurradas em meio urbano*. (2005) Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia Civil), Programa de Pós-Graduação de Engenharia, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 266 pp.
- Rabelo, G. C., Freire, R., Biscaino Neto, J. (2015) Índice de Qualidade das Águas Urbanas na Porção Urbana da Bacia do Córrego do Limoeiro. *XXVII Congresso de Iniciação Científica da Unesp*, Presidente Prudente, São Paulo.
- Ribeiro, A. M. (2014) *BMP's em drenagem urbana-aplicabilidade em cidades brasileiras*. Dissertação (Mestrado Engenharia), Departamento de Hidráulica e Ambiental, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo. São Paulo, 104 pp.
- Righetto, A. M., Gomes, K. M., Freitas, F. R. S. (2017) Poluição difusa nas águas pluviais de uma bacia de drenagem urbana. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, **22**(6), 1109 – 1120. Acesso em 15 de janeiro de 2018, disponível em: <https://doi.org/10.1590/s1413-41522017162357>
- Silva, S. A., Oliveira, R. (2001) *Manual de Análises Físico-Químicas de Águas de Abastecimento e Residuárias*, DEC/CCT/UFGP, Campina Grande, 266 pp.
- Soares, F. B. (2012) *Planejamento ambiental da bacia do Balneário da Amizade – São Paulo*. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geografia), Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, São Paulo, 153 pp.
- Tomaz, P. (2006) *Poluição Difusa*. Editora Navegar, 434 pp.
- Tucci, C. E. M. (2008) Águas urbanas. *Estudos Avançados*, **22**(63), 97-112. Acesso em 12 de julho de 2015, disponível em: <http://www.revistas.usp.br/eav/article/view/10295>
- Tucci, C. E. M. (2005) *Gestão de águas pluviais urbanas*. Ministério das Cidades – Global Water Partnership - World Bank – Unesco, 270 pp.

- Xue, B., Kang, X. (2012) Study on the Pollution Control and Resource Recovery of Urban Street Rainwater. *Energy Procedia*, **16**(1), 2-7. doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2012.01.002>
- Wang, S., He, Q., Al, H., Wang, Z., Zhang, Q. (2013) Pollutant concentrations and pollution loads in storm water runoff from different land uses in Chongqing. *Journal of Environmental Sciences*, **25**(3), 502-510. doi: [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(11\)61032-2](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(11)61032-2)
- Zhang, M., Chen, H., Wang, J., Pan, G. (2010) Rainwater utilization and storm pollution control based on urban runoff characterization. *Journal of Environmental Sciences*, **22**(1), 40-46. doi: [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(09\)60072-3](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(09)60072-3)