

Artigo Técnico

Poluição difusa nas águas pluviais de uma bacia de drenagem urbana

Diffuse pollution of storm water runoff from an urban catchment

Antonio Marozzi Righetto¹, Kaline Muriel Gomes², Francisco Rafael Sousa Freitas³

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo avaliar a primeira carga de lavagem de uma bacia urbana da cidade de Natal, Rio Grande do Norte, por meio da quantificação de cargas poluentes contidas nos deflúvios superficiais em decorrência de nove eventos de precipitação pluviométrica, monitorados ao longo do ano de 2013. As variáveis analisadas foram: sólidos totais, sólidos suspensos totais, demanda química de oxigênio, fósforo total e teor de óleos e graxas. Foi realizada a avaliação dos eventos de precipitação/escoamento, mediante amostragem progressiva do *runoff*, monitorado por meio de amostrador automático (ISCO 6712), situado no exutório da bacia, sendo analisados os primeiros 24 minutos do escoamento superficial, com amostras coletadas a cada minuto ao longo do evento. A variação da concentração dos poluentes associada à variação temporal dos deflúvios durante eventos de precipitação foi analisada para a verificação da ocorrência do fenômeno *first flush* ou primeira carga de lavagem. O período monitorado caracterizou-se por apresentar baixo intervalo de dias de estiagem entre os eventos. Foi observada a ocorrência de primeira carga de lavagem em cinco dos eventos monitorados. Dessa forma, evidenciou-se que para a bacia estudada o conceito de *first flush* pode ser aplicado nas estratégias de manejo de águas pluviais, para implementação de boas práticas de manejo, que vêm sendo amplamente difundidas no que concerne à drenagem urbana.

Palavras-chave: bacia de drenagem urbana; qualidade do deflúvio; primeira carga de lavagem.

ABSTRACT

The aim of this study was to evaluate the first wash load of an urban catchment located in the city of Natal, Rio Grande do Norte, Brazil, by quantifying pollution loads contained in surface run-offs from nine rainfall events, monitored throughout the year 2013. The variables analyzed were: total solids, total suspended solids, chemical oxygen demand, total phosphorus and oil and grease content. We conducted the evaluation of precipitation/runoff events through progressive sampling of runoff, monitored by autosampler (ISCO 6712), and located at the outlet of the drainage basin. The first 24 minutes of runoff were analyzed, with samples collected every minute throughout the event. The variation of the pollutants concentration associated with the temporal run-offs variation during precipitation was analyzed to verify the occurrence of the first flush phenomenon. The monitored period was characterized by having a low number of drought days between events. The occurrence of the first flush was observed in five of the monitored events. Thus, it became clear that for the studied basin, the concept of first flush could be applied in rainwater management strategies for the implementation of best management practices, which have been widely disseminated regarding urban drainage.

Keywords: urban drainage catchment; runoff quality; first flush.

INTRODUÇÃO

A expansão de áreas urbanas — caracterizada principalmente pela impermeabilização da bacia de drenagem, pelo avanço usualmente desordenado e pelo uso incompatível com a capacidade de suporte do meio — causa degradação progressiva do ambiente a partir das consequências advindas das mudanças de uso e ocupação do solo, ineficácia de infraestrutura adequada e limpeza pública insatisfatória.

No que se refere ao sistema de drenagem, esses impactos podem ser observados no agravamento das cheias, na diminuição da capacidade de infiltração de água no solo, na redução das vazões de estiagem dos cursos de água urbanos e periurbanos, e na deterioração da qualidade da água pluvial (PORTO, 1995; RIGHETTO; MOREIRA; SALLES, 2009; CARNEIRO & MIGUEZ, 2011). Infelizmente, o crescimento de uso e ocupação da bacia não vem acompanhado de melhorias no sistema de drenagem ou de controle nas fontes geradoras de deflúvios.

¹Professor titular aposentado da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) - Natal (RN), Brasil. Professor associado (aposentado) da Universidade de São Paulo (USP) - São Carlos (SP), Brasil. Professor colaborador do Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária da UFRN.

²Mestre em Engenharia Sanitária pela UFRN. Consultora em Engenharia Ambiental. Programa de Pós-graduação em Engenharia Sanitária da UFRN - Natal (RN), Brasil.

³Mestre em Engenharia Sanitária pela UFRN. Professor do Instituto Federal do Ceará (IFCE) - Fortaleza (CE), Brasil.

Endereço para correspondência: Antonio Marozzi Righetto - Rua Maçaranduba, 7.799 - Pitumbu - 59067-610 - Natal (RN), Brasil - E-mail: antmarrig@yahoo.com.br

Recebido em: 11/04/16 - **Aceito em:** 07/10/16 - **Reg. ABES:** 162357

Nesse contexto, observa-se que os deflúvios superficiais urbanos influenciam a qualidade dos corpos aquáticos, transportando diversos tipos de poluentes (sedimentos, nutrientes, matéria orgânica, bactérias e outros patogênicos, hidrocarbonetos, metais pesados e agentes tóxicos). A superfície do solo, principalmente ruas, sarjetas e telhados, é um dos principais contribuintes de poluentes para o escoamento superficial urbano, conferindo caráter difuso de poluição às águas pluviais urbanas, que, por sua vez, têm sua qualidade relacionada com o tipo de ocupação da bacia (FREITAS, 2013).

As principais soluções adotadas para o sistema de drenagem urbana consistem no emprego de lagoas de infiltração e detenção ou no lançamento direto das águas pluviais nos corpos receptores. Em geral, não há controle ou aproveitamento dessas águas para que se estimule a proteção contra a contaminação carregada pelos deflúvios superficiais.

Diante desse quadro, considera-se relevante o conhecimento da variação da qualidade da água dos escoamentos superficiais ao longo do tempo, associados a eventos chuvosos, com a possibilidade de se estabelecer um ponto de separação das primeiras águas (considerando-se que a maior parte da carga poluidora está concentrada no início do evento), a fim de que seja empregado algum manejo, como seria o caso da separação e do aproveitamento dessas águas, associado ao grau de qualidade requerido para os diversos usos e, desse modo, haja contribuição para a sustentabilidade ambiental urbana (FREITAS, 2013).

Cabe enfatizar o grande desafio em nível global referente ao meio urbano. Critérios de sustentabilidade da drenagem urbana englobam um novo paradigma, envolvendo várias áreas da engenharia e de ciências urbanas a fim de se considerar a complexidade do meio urbano e suas interações e soluções (ZHOU, 2014).

A poluição difusa é um processo que tem início com a lavagem e o transporte de poluentes atmosféricos pela chuva, a formação dos deflúvios superficiais que carregam grande parte dos poluentes depositados na superfície da bacia e o transporte ao seu destino final em um corpo receptor. Esse tipo de despejo, ao contrário dos lançamentos pontuais, é um fenômeno aleatório de difícil mensuração e cujas magnitudes dependem, principalmente, de fatores meteorológicos e do tipo de uso e ocupação do solo (FREITAS, 2013).

Porto (1995) afirma que a ocorrência do *first flush* é mais frequente em bacias pequenas do que em bacias maiores. Em grandes bacias, a diminuição das concentrações de poluentes pode não ocorrer tão rápido com o aumento do volume escoado. Nas bacias menores, as descargas iniciais carregam concentrações mais elevadas, e, ao se diluir com cargas menos concentradas em pontos próximos ao ponto de medição (devido ao tempo de trânsito), levam ao abatimento no polutograma gerado.

Porto (1995), Barco, Ciapponi e Papiri (2003), Settle, Goonetilleke e Ayoko (2007), Righetto *et al.* (2009) e Gastaldini e Silva (2012) realizaram estudos com o objetivo de avaliar o impacto da carga de drenagem urbana sobre um corpo receptor. A finalidade principal desses estudos foi a de se conhecer a carga de poluentes lançadas ao final de um evento, identificando as concentrações médias dos eventos ou mesmo a correlação dos poluentes com as partículas de sedimentos da bacia. Porém, conhecer a variação temporal das cargas poluentes é também importante para o gerenciamento dos deflúvios, possibilitando seu uso, tratamento e destinação adequados.

Diante do exposto, este trabalho objetivou realizar a avaliação temporal das cargas de poluentes contidas no escoamento superficial ao longo de eventos de precipitação pluviométrica monitorados durante do ano de 2013 em uma bacia urbana fechada na cidade de Natal, Rio Grande do Norte, para a verificação da ocorrência do fenômeno *first flush* ou primeira carga de lavagem (PCL).

REVISÃO DE LITERATURA

A característica mais marcante da poluição de origem difusa é a grande variabilidade da concentração dos poluentes presentes nas superfícies captadas pelos deflúvios e desaguadas em corpos d'água. As concentrações variam em ordens de magnitude entre bacias hidrográficas, entre diferentes eventos de precipitação e, também, ao longo de um mesmo evento (BAPTISTA & NASCIMENTO, 2005).

O entendimento das fontes potenciais de poluentes é importante para o estudo dos impactos do lançamento dos deflúvios. Embora a acumulação de poluentes na bacia seja proveniente de diversas fontes, cujos efeitos individuais são de difícil separação, o conhecimento qualitativo das prováveis fontes possibilita ao investigador concentrar-se nas áreas problemáticas e avaliar dispositivos de controle que podem ser usados para desviar cargas adversas antes que elas atinjam o sistema de macrodrenagem (PRODANOFF, 2005).

Reconhece-se a natureza transiente e imprevisível das fontes poluentes, e seus mecanismos de lançamento contribuem para a grande variabilidade dos processos de produção e transporte de contaminantes. Assim, em uma determinada localidade, as condições quali-quantitativas do escoamento flutuam significativamente durante um simples evento hidrológico e de evento para evento (PRODANOFF, 2005; AHLMAN, 2006). Novotny (1992) descreve cinco condições que caracterizam as fontes de poluição difusa:

- Lançamento da carga poluidora intermitente e que está relacionado com a precipitação.
- Os poluentes são transportados a partir de extensas áreas.
- As cargas poluidoras não podem ser monitoradas a partir do seu ponto de origem, mesmo porque sua origem exata é impossível de ser identificada.

- O controle da poluição de origem difusa obrigatoriamente deve incluir ações sobre a área geradora da poluição, em vez de incluir apenas o controle do efluente no lançamento.
- É difícil o estabelecimento de padrões de qualidade para o lançamento do efluente, uma vez que a carga poluidora lançada varia de acordo com a intensidade e a duração do evento meteorológico, a extensão da área de produção naquele específico evento e com outros fatores que tornam a correlação vazão x carga poluidora praticamente impossível de ser estabelecida.

Embora não exista regulamentação específica para os padrões de qualidade de águas de chuva, diversos países já desenvolveram seus guias e recomendações para o reúso urbano. Parâmetros de qualidade de água para uso não potável das águas pluviais especificados por alguns países indicam para a demanda bioquímica de oxigênio (DBO) valores inferiores a 20 mg/L e para sólidos suspensos totais (SST) valores inferiores a 30 mg/L (RIGHETTO *et al.*, 2009).

Variação temporal da qualidade da água

A concentração de poluentes ao longo do tempo associada a um determinado evento pluviométrico é uma informação útil para o gerenciamento da drenagem urbana, planejamento e dimensionamento de estruturas de controle de poluição. A obtenção do polutograma envolve planejamento detalhado, envolvendo a caracterização da bacia de drenagem, bem como os parâmetros quali-quantitativos envolvidos (FERREIRA, 2008).

A lavagem dos poluentes depositados durante o período seco e o transporte até as áreas receptoras é denominada *washoff* ou carga de lavagem de saída (LS). O processo LS engloba a dissolução de possíveis compostos solúveis nas primeiras águas de chuva com o molhamento da superfície e com turbulência suficiente para que ocorra a dissolução. Quanto maior a intensidade de chuva, maior será a ocorrência do processo de dissolução e transporte (GOONETILLEKE & THOMAS, 2003).

Estudo desenvolvido por Chebbo (1995) citado por Finotti *et al.* (2009), em um programa de pesquisa de qualidade de águas pluviais realizado na França, concluiu que a maior parte da poluição das águas pluviais encontra-se na forma suspensa. Essas partículas em suspensão apresentam uma grande quantidade de poluentes.

Os materiais em suspensão são formados principalmente por minerais, enquanto os materiais orgânicos não passam de 20% (como hidrocarbonetos). Já os nitritos, nitratos e fosfatos encontram-se sob a forma dissolvida. As partículas mais finas (>100 micrômetros) concentram a maior parte dos poluentes, adsorvidas sobre sua superfície — mais de 50% do chumbo e da demanda química de oxigênio (DQO) e da DBO. As águas dos telhados são as menos poluídas, por conterem pequena quantidade de material fino e baixa

concentração de hidrocarbonetos; por outro lado, se o telhado é metálico, pode vir a liberar seus compostos, como zinco e cádmio (FINOTTI *et al.*, 2009).

Somando-se a tudo isso, a natureza transiente e imprevisível das fontes de poluentes e seus mecanismos de lançamento contribuem para a grande variabilidade dos processos de produção e transporte de poluentes, definindo que, em uma determinada localidade, as condições quali-quantitativas do escoamento flutuam significativamente durante um simples evento hidrológico e de evento para evento (PRODANOFF, 2005).

Primeira carga de lavagem

Resultados de pesquisas conduzidas na década de 1970 concluíram que as concentrações de poluentes tendem a ser muito mais altas no início da tempestade, quando comparadas com o meio ou o final do evento (PRODANOFF, 2005). A explicação mais comum é que se trata da remoção inicial do material acumulado no período entre chuvas, quer sobre o solo quer no interior das canalizações, significando que o pico do polutograma deve ocorrer, em muitos casos, antes do pico das vazões.

A PCL é quantificada no período inicial do escoamento superficial, em que a concentração de poluentes é consideravelmente mais alta do que aquelas medidas com o passar do tempo. A identificação desse processo tem importância nos casos em que se pretende reter o escoamento superficial urbano em reservatórios de retenção para o controle de carga poluidora a ser lançada no corpo receptor, considerando que grande parte da carga poluidora estará contida no volume inicial escoado (PRODANOFF, 2005).

Deletic (1998) considera que a PCL se forma em um evento de chuva, quando mais de 20% da carga poluidora é carregada nos primeiros 20% do volume de deflúvio. Acrescenta ainda que esse processo ocorre em cerca de 60 a 80% dos eventos chuvosos sem, no entanto, ser definido com precisão.

Pit (2004) citado por Tomaz (2006) verificou que, de modo geral, 55% dos parâmetros estudados apresentaram PCL. Dentre eles, a DBO, a DQO, sólidos totais, nitrogênio total e zinco foram observados na PCL de todas as bacias urbanas pesquisadas por esse autor. Lee *et al.* (2001) enfatizam ainda que a ocorrência desse fenômeno é dependente do tipo de poluição (dissolvida, particulada), área da bacia hidrográfica, contribuição de áreas impermeáveis e intensidade da precipitação.

Vaze e Chiew (2003) demonstraram que parte dos sedimentos presentes na superfície pode se desagregar ou se dissolver dependendo da intensidade e da duração de cada evento de precipitação. Pequenos eventos de precipitação desagregam, principalmente, a carga livre, enquanto eventos maiores podem desprender, também, sedimentos fixados na superfície do terreno, podendo ainda dissolver parte dessa carga.

Dias antecedentes de estiagem e concentração média do evento

Considerando que os contaminantes são depositados na bacia hidrográfica ao longo do tempo, pode-se supor que o maior carregamento de poluentes ocorra em eventos chuvosos com número maior de dias antecedentes de estiagem (IDE, 1984).

Estudos realizados por Cheong (1991) em duas bacias urbanas em Singapura demonstraram a existência de fortes correlações entre SST, DQO e dias antecedentes de estiagem (DAE) nos eventos chuvosos monitorados. Entretanto, para a avaliação global do impacto das cargas difusas, pode-se determinar a concentração média de um parâmetro de qualidade de água por amostragem composta, denominada concentração média no evento (CME), definida como a relação entre a massa total do poluente transportado e o volume total escoado durante o evento, representando a concentração que resultaria se toda a descarga da drenagem pluvial fosse coletada em um único recipiente (SHELLEY; DRISCOLL; SARTOR, 1987 *apud* THOMSON *et al.*, 1997; NOVOTNY & CHESTERS, 1981).

De acordo com Novotny (1992), a aplicação da CME pode ser considerada como um índice de poluição potencial do evento com as vantagens de exibir distribuição Lognormal, ser um parâmetro conciso, representar um conjunto variável de dados e fornecer melhor comparação entre eventos e locais diferentes.

ÁREA DE ESTUDO

A pesquisa foi desenvolvida em uma bacia de drenagem urbana situada no conjunto habitacional Mirassol, no bairro de Capim Macio, Natal, Rio Grande do Norte (Figura 1). A referida bacia tem área de 0,14 km², altitude máxima de 61,10 m e mínima de 34,90 m (exutório), o qual está localizado na entrada de uma lagoa de detenção e infiltração, para onde o fluxo dos deflúvios é direcionado pelas galerias e bocas de lobo através de uma tubulação de 0,80 m de diâmetro.

A cidade de Natal apresenta características topográficas que propiciam a formação de bacias fechadas, como é o caso da bacia estudada. O relevo é predominantemente de dunas associadas a formações lacustres, com trechos apresentando grandes declividades.

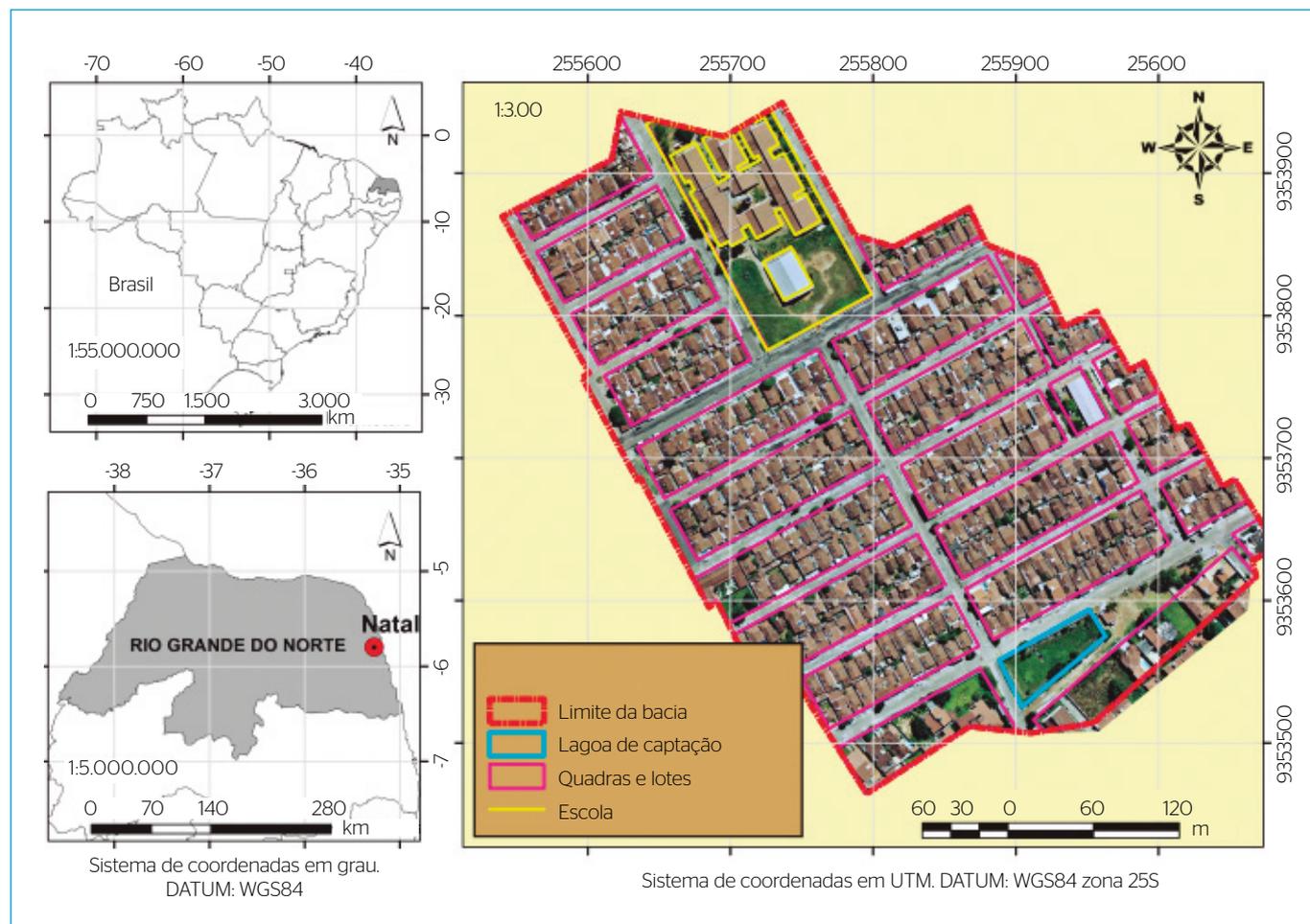


Figura 1 - Localização da bacia de drenagem.

O padrão de ocupação da área é do tipo residencial unifamiliar, classe B e C, sem tráfego pesado de veículos, tampouco indústrias de grande porte/potencial poluidor, com predomínio de lotes de 200 m² e construções com cobertura em material cerâmico.

As condições predominantes de cobertura do solo são as vias em paralelepípedo, exceto a via principal, que apresenta revestimento asfáltico, prevalecendo arruamentos de classificação secundária, indicando alto grau de impermeabilização.

As condições atuais de uso e ocupação do solo foram determinadas a partir de imagem do satélite IKONOS, sendo observados os seguintes aspectos: (1) áreas permeáveis: terrenos sem cobertura ou jardins (5,5%) e lagoa de infiltração (0,1%); (2) áreas impermeáveis: quadra/ telhados (75,0%), rua com pavimento asfáltico (2,4%); (3) rua com pavimento em paralelepípedo (16,7%).

METODOLOGIA

O período de amostragem ocorreu ao longo do ano de 2013 (julho a outubro), sendo as coletas de amostras de água do escoamento superficial realizadas durante os eventos de precipitação pluviométrica por meio de amostrador automático ISCO 6712, a fim de se fazer a análise progressiva da qualidade da água escoada. Analisaram-se os primeiros 24 minutos do escoamento superficial, recolhendo-se uma amostra a cada minuto, sendo monitorados, ao todo, 9 eventos.

Os dados de precipitação foram obtidos por meio de uma estação pluviométrica monitorada pelo Projeto Manejo de Águas Pluviais Urbanas (MAPLU/FINEP), localizada na área de monitoramento do projeto. O pluviômetro automático digital foi programado para registrar o valor da precipitação a cada cinco minutos e também o total diário. Na entrada de água para a lagoa, um vertedor com linímetro digital automático permitia registrar os níveis de água e, assim, estimar as vazões de entrada através de equação de vertedouro retangular.

A análise dos dados consistiu em apresentar a variação da qualidade da água ao longo do evento de precipitação, de forma a realizar a comparação das concentrações medidas ao longo do evento com seus respectivos volumes. Para tanto, foram elaboradas as curvas adimensionais massa x volume — $M(V)$ — para os parâmetros avaliados.

A curva $M(V)$ apresenta a relação da fração de massa de poluente removida com a fração de volume escoado ao longo do período do evento de precipitação estudado.

A determinação da ocorrência do fenômeno de *first flush* está relacionada com a análise da curva $M(V)$. Quando a curva $M(V)$ do evento estudado estiver acima do bissetor do gráfico, considera-se a ocorrência de *first flush* (FERREIRA, 2008).

Quanto à proporção entre a parcela do volume e a parcela de remoção de massa, foi adotada a proporção de X% de massa removida para

os primeiros 30% de volume, a qual foi calculada pela regressão de potência quando o coeficiente de determinação $R^2 \geq 0,90$, conforme descrito em Ferreira (2008).

Os aspectos qualitativos das águas de escoamento superficial foram analisados por meio das seguintes variáveis: DQO, fósforo total (FT), teor de óleos e graxas (TOG), sólidos totais (ST) e SST (Tabela 1).

Os resultados das análises de qualidade das águas pluviais permitiram construir os polutogramas de cada evento observado, utilizando-se intervalos de tempo de 5 minutos e duração correspondente ao tempo de concentração da bacia, da ordem de 25 minutos. Além de comparações entre polutogramas e hietogramas, foi realizada a análise global por evento, considerando-se o parâmetro CME segundo o procedimento descrito a seguir.

A CME é calculada como sendo a massa total (M_T) do poluente dividida pelo volume total (V_T) do deflúvio superficial, para um evento de duração t_T (SANSALONE & BUCHBERGER, 1997; CHARBENEAU & BARRETTI, 1998 *apud* OLIVEIRA, 2007), expressa pela Equação 1.

$$CME = \bar{C} = \frac{M_T}{V_T} \quad (1)$$

A massa total (M_T) de um poluente transportado em um evento de duração t_T é expressa pela Equação 2.

$$M_T = \int_0^{t_T} C(t)Q(t)dt \quad (2)$$

sendo:

$C(t)$: concentração do contaminante, variável no tempo;

$Q(t)$: deflúvio, também em função do tempo.

Assim, o volume total do deflúvio é expresso pela Equação 3.

$$V_T = \int_0^{t_T} Q(t)dt \quad (3)$$

Com as Equações 2 e 3, a CME é expressa pela Equação 4.

Tabela 1 - Parâmetros monitorados, respectivos métodos e referências.

Parâmetro	Método	Referência
Demanda química de oxigênio (mgO ₂ .L ⁻¹)	Titulométrico - digestão por refluxação fechada	AWWA/APHA/WEF (1998)
Fósforo total (mgPL ⁻¹)	Espectrofotométrico - digestão ácida com persulfato de potássio	Valderrama (1981), Murphy e Rilley (1962)
Teor de óleos e graxas (mg.L ⁻¹)	Gravimétrico - extração em sohxlet com éter de petróleo	AWWA/APHA/WEF (1992)
Sólidos totais (mg.L ⁻¹)	Gravimétrico - secagem a 103 a 105°C	AWWA/APHA/WEF (1998)
Sólidos suspensos totais (mg.L ⁻¹)	Gravimétrico - Filtração a vácuo com membrana de fibra de vidro 0,45 µm de porosidade - Secagem a 103° - 105°C	AWWA/APHA/WEF (1998)

$$CME = \bar{C} = \frac{M_T}{V_T} = \frac{\int_0^T C(t)Q(t)dt}{\int_0^T Q(T)dt} \quad (4)$$

Entretanto, as medições são realizadas em intervalos de tempo Δt , de modo que a CME é calculada pela Equação 5.

$$CME \cong \frac{\sum_{i=1}^{i=n} C_i Q_i \Delta t}{\sum_{i=1}^{i=n} Q_i \Delta t} \quad (5)$$

em que:

n: número de amostras ou de intervalos de tempo com medições;

C_i: concentração em cada tempo associado a *i*;

Q_i: deflúvio discreto a cada tempo *i*;

Δt : intervalo de tempo de medições do evento.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Avaliação progressiva da poluição difusa na superfície da bacia

A avaliação do potencial poluidor dos deflúvios na bacia foi realizada com base nas concentrações médias dos parâmetros analisados em cada evento (Tabela 2). As maiores variações entre eventos ocorreram para os parâmetros FT — com coeficiente de variação (CV) 2,21 — e DQO (CV=2,0), entretanto a menor variação foi observada para as concentrações de TOG (CV=0,85).

O período monitorado caracterizou-se por apresentar baixo intervalo de dias secos (DAE), e o maior intervalo observado entre eventos foi de aproximadamente 15 dias.

Considerando que um maior número de DAE pode resultar em maior concentração de poluentes depositados sobre a superfície da bacia e, conseqüentemente, em maior carreamento de poluentes para um dado evento chuvoso, realizou-se a análise de correlação entre as concentrações médias dos parâmetros analisados e os DAE de cada evento.

Observou-se que as correlações realizadas entre DAE e os parâmetros analisados foram estatisticamente significativas apenas para DQO (p=0,033; R=0,71) e FT (p=0,049; R=0,67). Entretanto, deve-se salientar que o pequeno número de dados (n=9) e/ou a pequena amplitude de dias antecedentes de estiagem podem ter contribuído para as baixas correlações encontradas.

Dessa forma, foram realizadas análises de regressão linear simples entre dias antecedentes de estiagem e a DQO e FT (Figura 2). As análises de regressão mostraram que cerca de 50% da variação das concentrações de DQO foi explicada pela variação nos valores de DAE (R²=0,50), ao passo que para as concentrações de FT a variação nos valores de DAE explica cerca de 45% da variação desse parâmetro (R²=0,45).

De forma geral, a CME para ST variou de um valor máximo de 772,06 a 57,84 mg/L ao longo dos eventos monitorados. Com base nas curvas M(V) apresentadas na Figura 3, foi detectada a ocorrência do fenômeno PCL em cinco dos nove eventos monitorados. As maiores proporções de remoção observadas ocorreram nos eventos dos dias 02 de julho de 2013 e 19 de julho de 2013 e cujas proporções de remoção da massa ST foram de 54,4 e 46,1% nos primeiros 30% do volume, respectivamente.

Tabela 2 - Concentração média por evento dos parâmetros analisados.

Data do evento	Dias antecedentes de estiagem	Sólidos totais (mg.L ⁻¹)	Sólidos suspensos totais (mg.L ⁻¹)	Demanda química de oxigênio (mg O ₂ .L ⁻¹)	Fósforo total (mgP.L ⁻¹)	Teor de óleos e graxas (ug.L ⁻¹)
02/07/2013	2,7	190,8	39,9	66,5	0,27	5,0
17/07/2013	2,0	57,8	20,7	42,4	0,16	11,0
19/07/2013	1,0	415,0	37,2	126,4	0,20	9,0
09/08/2013	3,1	450,0	33,4	172,0	0,35	15,0
14/08/2013	4,0	276,7	59,8	73,7	0,25	66,0
25/08/2013	2,1	99,2	15,7	51,5	0,45	12,0
20/09/2013	5,1	146,4	17,1	124,6	0,53	7,0
09/10/2013	0,9	772,1	129,9	65,7	0,55	14,0
24/10/2013	14,7	394,5	93,6	159,7	0,64	6,0
Média	4,0	311,3	49,7	98,0	0,38	16,0
Mediana	2,7	276,7	37,2	73,7	0,35	11,0
Desvio padrão	4,2	224,0	38,8	48,3	0,17	19,0
Maior	14,7	772,1	129,9	172,0	0,64	66,0
Menor	0,9	57,9	15,7	42,4	0,16	5,0
Coefficiente de variação	0,9	1,4	1,3	2,0	2,21	0,85

Para as concentrações de SST, a CME apresentou variação entre 15,7 e 129,9 mg/L ao longo dos eventos observados. Quanto às análises das curvas M(V) obtidas para SST (Figura 3A), verifica-se que a PCL ocorreu em quase todos os eventos, mais precisamente em sete dos nove eventos monitorados. As maiores remoções de SST foram observadas nos eventos dos dias 02 de julho e 25 de agosto de 2013, com proporções de remoção de massa de 56,2 e 40,5% nos primeiros 30% do volume, respectivamente. A maior ocorrência do PCL pode estar associada à maior facilidade de desagregação e transporte, pela chuva, dessas partículas que apresentam em média diâmetro menor do que 1,5 μm .

Para a DQO, os valores da CME variaram entre 172,0 e 42,4 $\text{mgO}_2\text{L}^{-1}$. Quando são observadas as curvas M(V) para a DQO (Figura 3B), dos nove eventos analisados, seis apresentaram ocorrência do PLC, com as respectivas curvas situadas acima do bisetor do gráfico. A alta ocorrência do PCL associada à DQO encontrada neste estudo corrobora o descrito na literatura (PIT, 2004 *apud* TOMAZ, 2006). A maior remoção de DQO foi observada no evento do dia 19 de julho de 2013, com proporção de remoção de massa de 49,2% nos primeiros 30% do volume escoado no exutório da bacia.

As CME para FT apresentaram variação entre 0,16 e 0,64 mg FT.L^{-1} . Esses valores se aproximam bastante da faixa observada por Ferreira (2008), mas estiveram bem acima do constatado por Silva (2011), ao estudar a qualidade da água das lagoas de retenção e infiltração do sistema de drenagem de Natal, Rio Grande do Norte. Com base nas curvas M(V) apresentadas na Figura 3C, a ocorrência do fenômeno PCL para o FT foi menos pronunciada, sendo evidente em apenas três dos nove eventos analisados. A maior remoção de FT foi observada no evento do dia 19 de julho de 2013, com proporção de remoção de massa de 40,9% nos primeiros 30% do volume escoado.

A CME para TOG variou de 5,0 a 66,0 ug.L^{-1} , apresentando comportamento praticamente uniforme entre eventos, quando comparado aos outros parâmetros monitorados. Ressalta-se que tais concentrações são baixas e podem estar associadas, dentre outros aspectos, à maior aderência dos óleos e graxas à superfície da bacia ou à pequena produção desses resíduos pelo tráfego urbano. As curvas M(V) para TOG mostraram que, dos eventos analisados, apenas o ocorrido no dia 24 de outubro de 2013 apresentou evidência de *first flush*, cuja curva esteve acima do bisetor do gráfico (Figura 3D). A ocorrência da maior remoção foi observada no referido evento, com proporção de remoção de 53% de massa nos primeiros 30% do volume escoado na bacia.

Na Figura 4 estão representados os polutogramas, considerando a precipitação acumulada a cada cinco minutos. Os eventos dos dias 02 de julho, 19 de julho e 25 de outubro de 2013 revelam depressões nas curvas de concentração. Isso pode ser associado ao fato de que no início da precipitação boa parte dos poluentes contidos na bacia é carregada, causando queda acentuada da curva logo após o início do evento. A redução da precipitação também leva à depleção da curva, com recuperação posterior em decorrência do aumento da lâmina de chuva.

Na Figura 5, são apresentadas correlações entre SST x DQO e SST x FT para os eventos ocorridos nos dias 02 de julho e 25 de agosto de 2013, os quais apresentaram as maiores correlações entre essas variáveis (SST x DQO, $R^2=0,97$); (SST x FT, $R^2=0,98$) e (SST x DQO, $R^2=0,76$); (SST x FT, $R^2=0,96$), respectivamente.

Os eventos que resultaram em maior remoção de massa de SST foram os que apresentaram maior correlação entre os parâmetros FT, DQO e SST, associados também às maiores intensidades de precipitação pluviométrica nos primeiros minutos dos eventos medidos. Pode-se observar também a queda acentuada das concentrações dos parâmetros estudados nos primeiros 15 minutos de ocorrência do evento.

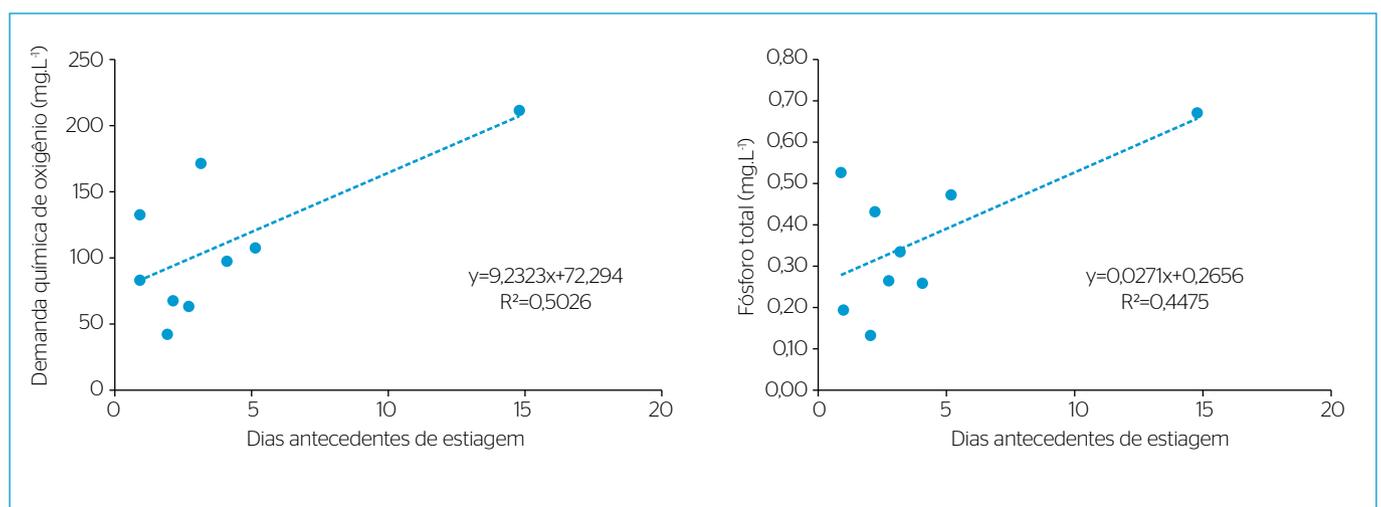


Figura 2 - Regressão linear simples entre dias antecedentes de estiagem, demanda química de oxigênio e fósforo total.

Talvez o número reduzido de dados tenha implicado na ausência de uma relação determinística confiável, apesar de incertezas e aleatoriedade dos poluentes presentes no deflúvio serem esperadas durante a primeira carga de lavagem.

Estudos realizados por Graf (1971) e Vanoni (1975) *apud* James *et al.* (2003), Vaze e Chiew (2003), Gastaldini e Silva (2012) e Settle, Goonetilleke e Ayoko (2007) têm demonstrado que a ocorrência da PCL, além de permitir avaliar a área de lavagem da bacia, mostra a

maior facilidade de desagregação e transporte das partículas sólidas pela chuva. Ou seja, além das características da chuva, as características dos grãos também devem ser levadas em consideração no momento da desagregação e transporte de massa de poluente.

Vale mencionar que, ao estudar os sólidos e fósforo como indicadores de poluição, Settle, Goonetilleke e Ayoko (2007) verificaram que os sólidos agem como um substrato móvel para o transporte de outros poluentes, como metais pesados e hidrocarbonetos. A quantidade de sólidos

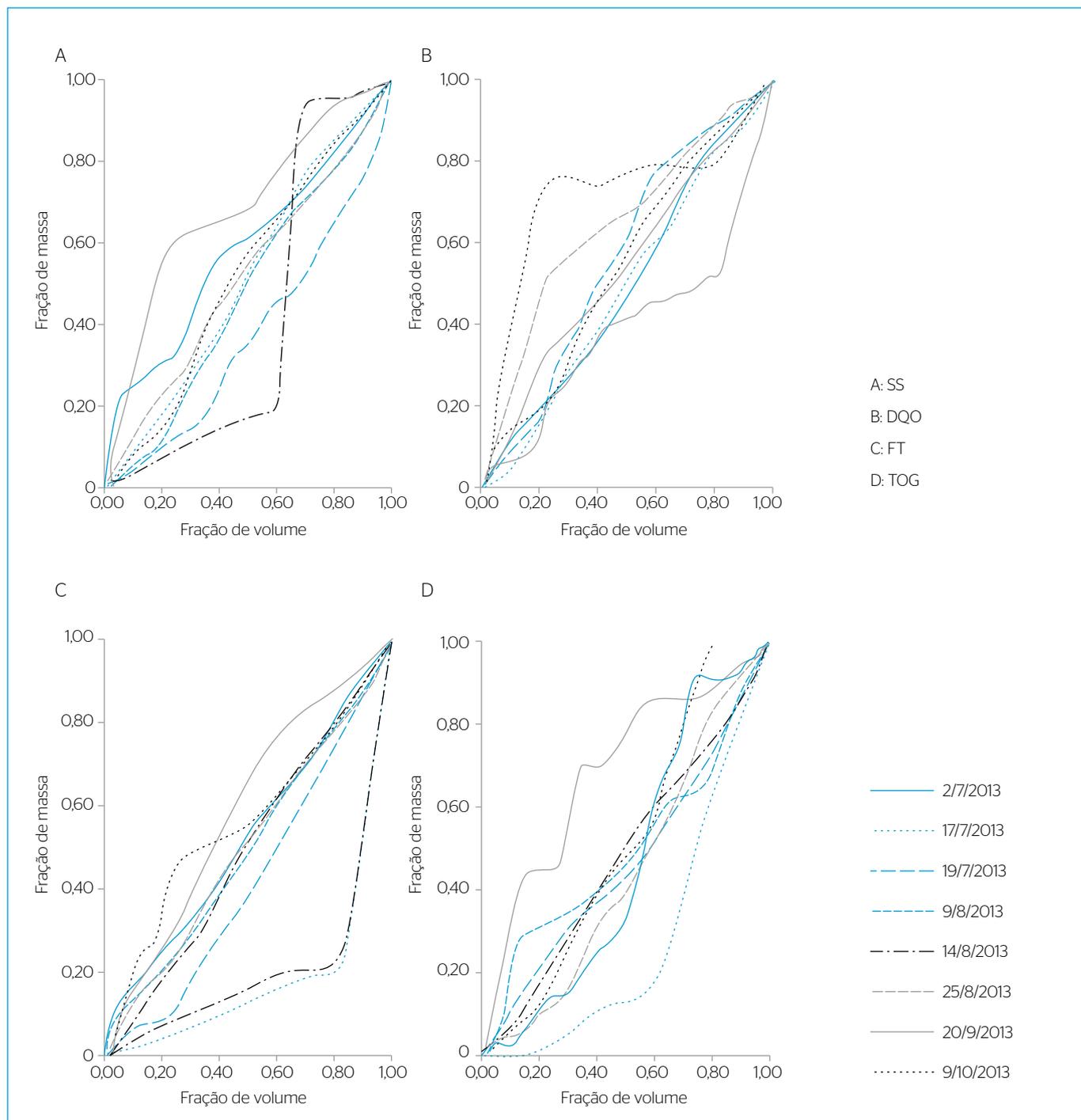


Figura 3 - Curvas M(V) de (A) sólidos suspensos; (B) demanda química de oxigênio; (C) fósforo total; e (D) teor de óleos e graxas.

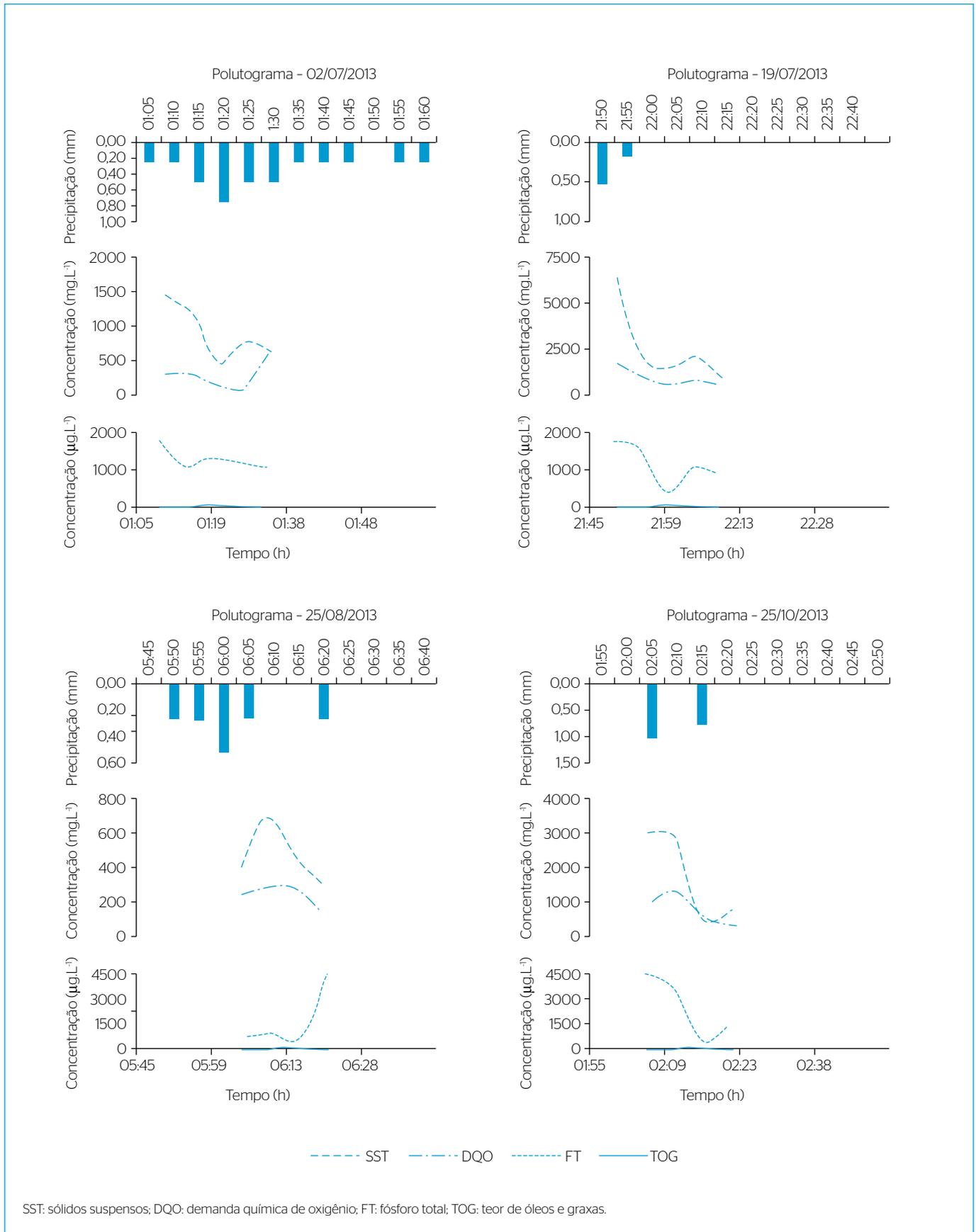


Figura 4 - Polutogramas observados com amostras coletadas em intervalos de 5 minutos ao longo dos primeiros 25 minutos do evento chuvoso.

disponíveis para o carreamento, bem como o conhecimento meteorológico dos primeiros minutos dos eventos, é de grande importância para a avaliação da carga de poluentes associadas aos sólidos em suspensão.

CONCLUSÕES

A análise da poluição difusa nas ruas de uma área urbana é complexa e de difícil mensuração. O escoamento pluvial pode carrear resíduos sólidos, sedimentos e poluentes provenientes de áreas vizinhas às ruas,

havendo interferência também de ligações clandestinas de esgoto doméstico direto nas vias ou elementos de microdrenagem, como verificado neste estudo. Somado aos depósitos distribuídos, tem-se o sedimento retido nas bocas de lobo e áreas de estagnação das águas.

Os resultados do monitoramento da qualidade dos deflúvios da bacia-piloto de Mirassol mostraram que o deflúvio superficial apresenta grande potencial poluidor de corpos d'água. Foram constatadas, em diferentes intensidades de precipitação, altas taxas de concentração de poluentes carreados pelos deflúvios superficiais.

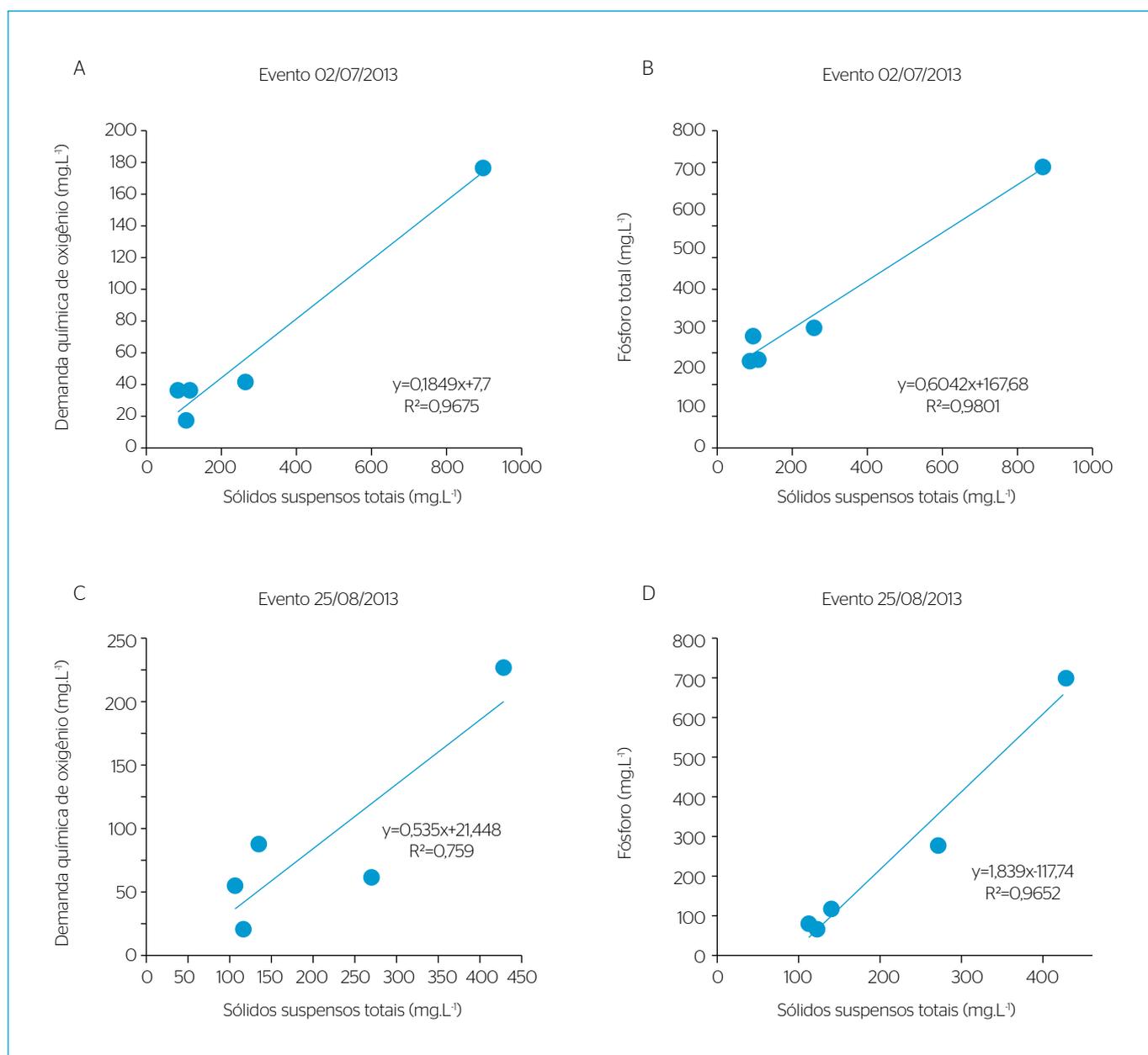


Figura 5 - Correlações entre sólidos suspensos totais, demanda química de oxigênio (A e C) e fósforo total (B e D) em eventos dos dias 02/07/2013 e 25/08/2013.

Entre as variáveis analisadas, destaca-se o FT. Essa variável é de grande importância, uma vez que é um nutriente limitante, capaz de causar a deterioração da qualidade da água pela eutrofização dos corpos d'água.

Os eventos que resultaram em maior remoção de massa de SST foram os que apresentaram, também, maior correlação entre a quantidade de FT e DQO com SST e associados às maiores intensidades de precipitação pluviométrica nos primeiros minutos dos eventos medidos. Observou-se, pelos polutogramas levantados, queda acentuada das concentrações dos parâmetros estudados nos primeiros 15 minutos de ocorrência do evento.

Embora a CME seja um indicador variável que depende da intensidade da chuva e das características da bacia, pode ser considerada um indicador conciso, que permite comparações úteis entre os níveis de concentração de poluentes gerados pela bacia com diferentes intensidades de precipitação e diferentes períodos antecedentes sem chuva. Mesmo com deflúvios reduzidos, a CME é elevada, apresentando um pico e, nos eventos mais significativos, representa as primeiras cargas de lavagem das ruas.

Além da CME, concluiu-se por levar em consideração a concentração de contaminantes no início do escoamento. Mesmo com deflúvios reduzidos, ela é elevada, apresenta um pico e, nos eventos mais significativos, representa as primeiras cargas de lavagem das ruas. Confirmou-se a ocorrência de *first flush* ou PCL distinguível e concentrada em bacias de pequeno porte, como a bacia de Mirassol deste estudo.

A evidência de PCL para determinadas intensidades de precipitação pluviométricas e a forte correlação entre FT e DQO com SST

associados a um mesmo evento pode propiciar estratégias de manejo das águas pluviais, como a implantação de sistemas separadores e de tratamento das primeiras águas do escoamento superficial em relação ao restante do escoamento, considerado de melhor qualidade. Com esse manejo, pode-se ter melhor aproveitamento da parcela, de qualidade superior das águas pluviais considerando-a como recurso hídrico de alto valor.

O emprego das curvas adimensionais $M(V)$ é útil para a caracterização da ocorrência do PCL, além de subsidiar a definição dos volumes que deverão ser separados durante o escoamento, auxiliando no dimensionamento das estruturas de drenagem, responsáveis pela coleta e pelo tratamento da parcela escoada.

Para a bacia-piloto de Mirassol, com área de drenagem de 0,14 km², com os valores de CME foram encontradas as seguintes faixas de remoção, em mg.L⁻¹: ST (58 a 770); SS (16 a 130); DQO (42 a 172); FT (0,15 a 0,65); TOG (0,005 a 0,066). A remoção pela PCL nos primeiros 30% do volume pluvial escoado resultou nos seguintes percentuais em massa: ST (50%); SS (50%); DQO (49%); FT (41%); TOG (53%).

Como recomendação, sugere-se o monitoramento de bacias urbanas com áreas de drenagem da ordem de 1 a 2 km², visando a ser obter polutogramas mais distribuídos, possibilitando utilizar intervalos de tempo maiores, de 5 minutos, por exemplo, e assim fazer melhor uso dos coletores automáticos de amostras de águas pluviais. Essa faixa de área recomendada ainda seria suficientemente pequena para permitir a análise distribuída de parâmetros hidrológicos e de poluentes presentes de forma difusa.

REFERÊNCIAS

- AHLMAN, S. (2006) *Modelling of substance flows in urban drainage systems*. 90p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil e Ambiental) – Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Chalmers University of Technology, Göteborg, Suécia.
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION – APHA; AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION – AWWA; WATER ENVIRONMENT FEDERATION – WEF. (1992) *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 18 ed. Washington: APHA.
- _____. (1998) *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 20 ed. Washington: APHA.
- BAPTISTA, M.B. & NASCIMENTO, N.O. (2005) Hidrologia urbana e drenagem. In: Seminário Qualidade das Águas, 1., Belo Horizonte. *Anais eletrônicos...* Belo Horizonte: UFMG – Escola de Engenharia – Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos.
- BARCO, O.J.; CIAPONI, C.; PAPIRI, S. (2003) *Quantitative and qualitative analysis of storm water runoff in an urban experimental catchment*. Paris, France.
- CARNEIRO, P.R.F. & MIGUEZ, M.G. (2011) *Controle de inundações em bacias hidrográficas metropolitanas*. São Paulo: Annablume. v. 1. 330 p.
- CHEONG, C.P. (1991) Quality of storm water runoff from an urbanized watershed. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 19, n. 1, p. 449-456.
- DELETIC A. (1998) The first flush load of urban surface runoff. *Water Research*, v. 32, n. 8, p. 2462-2470.
- FERREIRA, L.C.A. (2008) *Variação da qualidade da água do escoamento superficial de duas bacias de drenagem de Natal / RN – Brasil*. 100p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

- FINOTTI, A.; FINKLER, R.; SILVA, M.D.; CEMIN, G. (2009) *Monitoramento de recursos hídricos em áreas urbanas*. Caxias do Sul: EDUCS. 270p.
- FREITAS, F.R.S. (2013) *Avaliação progressiva da qualidade da água do escoamento superficial de uma bacia fechada de drenagem urbana*. 53p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.
- GASTALDINI, M.C.C. & SILVA, A.R.V. (2012) Pollutant distribution in urban surface. *In: International Conference on Urban Drainage, 2., Porto Alegre. Anais...*
- GOONETILLEKE, A. & THOMAS, E. (2003) Water quality impacts of urbanization: evaluation of current research. *In: CENTRE FOR BUILT ENVIRONMENT AND ENGINEERING RESEARCH. Energy & Resource Management Research Program. Research Report. Queensland: Centre for Built Environment and Engineering Research, Queensland University of Technology.*
- IDE, C.N. (1984) *Qualidade da drenagem pluvial urbana. Porto Alegre*. 137p. Dissertação (Mestrado em Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- JAMES, W.; HUBER, W.C.; DICKINSON, R.E.; PITT, R.E.; JAMES, W.R.C.; ROSENER, L.A.; ALDRICH, J.A. (2003) *User's Guide to SWMM*. Guelph, Ontário, Canadá: CHI.
- LEE, J.H.; BANG, K.W.; KETCHUM, L.H.; CHOE, J.S.; YU, M.J. (2001) First flush analysis of urban storm runoff. *The Science of the Total Environment*, v. 293, p. 163-175.
- MURPHY, J. & RILLEY, J.P. (1962) A modified single-solution method for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica Chimica Acta*, v. 27, p. 31-36.
- NOVOTNY, V. (1992) Unit pollutant loads. *Water Environment & Technology*, v. 4, n. 1, p. 40-43.
- NOVOTNY, V. & CHESTERS, G. (1981) *Handbook of nonpoint pollution: sources and management*. New York: Van Nostrand Reinhold. 556p.
- OLIVEIRA, H.A.R. (2007) *Qualidade da drenagem pluvial rural: Rio Taquarizinho*. 168p. Dissertação (Mestrado em Tecnologias Industriais) – Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, Campo Grande.
- PORTO, M. (1995) Aspectos qualitativos do escoamento superficial em áreas urbanas. *In: TUCCI, C.E.M.; PORTO, R.L.; BARROS, M.T. Drenagem urbana*. Porto Alegre: Editora da UFRGS/ABRH. p. 387-428.
- PRODANOFF, J.H.A. (2005) *Avaliação da poluição difusa gerada por enxurradas em meio urbano*. 264p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ.
- RIGHETTO, A.M.; ANDRADE NETO, C.O.; BRITO, L.P.; SALES, T.E.A.; MEDEIROS, V.M.A.; FERREIRA, L.C.A.; LIMA, R.R.M. (2009) Estudo quali-quantitativo de manejo de águas pluviais em área de drenagem piloto na cidade de Natal-RN. *In: RIGHETTO, A.M. (Org.). Manejo de águas pluviais urbanas*. PROSAB 5. Rio de Janeiro: ABES. 396p. p. 218-255.
- RIGHETTO, A.M.; MOREIRA, L.F.F.; SALES, T.E.A. (2009) Manejo de águas pluviais urbanas. *In: RIGHETTO, A.M. (Org.). Manejo de águas pluviais urbanas*. PROSAB 5. Rio de Janeiro: ABES. 396p. p. 19-73.
- SANSALONE, J.J. & BUCHBERGER, S.G. (1997). Partitioning and first flush of metals in urban roadway storm water. *Journal of Environmental Engineering*, v. 123, n. 2, 134-143.
- SETTLE, S.; GOONETILLEKE, A.; AYOKO, G. (2007) Determination of surrogate indicators for phosphorus and solids in urban stormwater: application of multivariate data analysis techniques. *Water Air and Soil Pollution*, v. 182, n. 1-4, p. 149-161.
- SILVA, S.T. B. (2011) *Uso urbano não potável de água de lagoas do sistema de drenagem de Natal*. Dissertação (Mestrado em Saneamento Ambiental; Meio Ambiente; Recursos Hídricos e Hidráulica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.
- THOMSON, N.R.; MCBEAN, E.A.; SNODGRASS, W.; MONSTRENKO, I.B. (1997) Highway stormwater runoff quality: development of surrogate parameter relationships. *Water, Air, and Soil Pollution*, n. 94, p. 307-347.
- TOMAZ, P. (2006) *Poluição difusa: trincheira de infiltração, bacia de infiltração, pavimento permeável, poluição difusa, first flush, gestão ambiental, wetland, custos, canais gramados*. São Paulo: Navegar. 300p.
- VALDERRAMA, J.C. (1981). The simultaneous analysis of total N and total P in natural waters. *Marine Chemistry*, v. 10, p. 109-122.
- VAZE, J. & CHIEW, F.H.S. (2003) Study of pollutant washoff from small impervious experimental plots. *Water Resources Research*, v. 39, n. 6, p. 3-10.
- ZHOU, Q. (2014) A review of sustainable urban drainage systems considering the climate change and urbanization impacts. *Water*, v. 6, p. 976-992.