

BIORRETENÇÃO DA POLUIÇÃO DIFUSA NA DRENAGEM URBANA USANDO ABORDAGEM EXPERIMENTAL-ADAPTATIVA COM BASE ECOHIDROLÓGICA

Altair Rosa^{1}, E. Mario Mendiondo² & Vladimir C. Borges de Souza³*

Resumo – Os métodos de dimensionamento de Técnicas Compensatórias (TCs) normalmente estão baseados ou em controle quantitativo ou qualitativo, ainda não estando evidentes a integração dos dois aspectos. Este trabalho apresenta uma abordagem para experimentos demonstrativos de TCs com foco no controle quali-quantitativo do escoamento urbano, buscando metodologias generalizadas de dimensionamento e avaliação de eficiência com base eco-hidrológica, como estratégias de adaptação de longo prazo. A abordagem possibilita dimensionamento modular de detenção superficial ($V_{max_{quant}}; eff\Delta Q_{quant}$), de detenção de cargas poluidoras ($V_{max_{qual}}; eff\Delta Y_{qual}$) e de biorretenção ($V_{max_{bio}}; eff\Delta X_{bio}$). A abordagem adaptativa estuda como as TCs aumentam a vida útil da obra a comparar: (i) futuras demandas $\Delta Q_{quant}(t)$, $\Delta Y_{qual}(t)$ e $\Delta X_{bio}(t)$, e (ii) capacidade do sistema $V_{maxTC}(t)$ pela integração de eficiências $eff\Delta Q_{quant}(t)$, $eff\Delta Y_{qual}(t)$ e $eff\Delta X_{bio}(t)$.

Palavras-Chave – Drenagem urbana, Técnicas compensatórias, Biorretenção

BIORRETENTION TO CONTROL DIFFUSE POLLUTION IN THE URBAN DRAINAGE SYSTEM: EXPERIMENTAL-ADAPTIVE APPROACH WITH ECOHYDROLOGICAL BASIS

Abstract – Normally, the methods to design compensatory techniques (TC's) are based on quality control or quantity control: there is no quality-quantity integration approach. This research presents demonstrative experiments on TC's, focusing on an integrative approach in quality and quantity aspects of urban drainage system. We are looking for generalized methodologies to design and to evaluate TC's efficiency with an ecohydrological basis. Long term adaptive strategies of TC's are also evaluated. The experimental approach includes modular dimensioning of detention devices to control runoff ($V_{max\ quantity}; eff\ \Delta Q_{quant}$) and pollutant loads ($V_{max, quality}; eff\Delta Y, quality$) and biorretention ($V_{max, bio}; eff\Delta X, bio$). The adaptive approach analyses how the TC's can be adapted during the lifetime of the devices through two future modifications: (1) the demands of urban drainage ($\Delta Q_{quant}(t)$, $\Delta Y_{qual}(t)$ and $\Delta X_{bio}(t)$), and (2) system capacity $V_{maxTC}(t)$ by integrating efficiencies $eff\Delta Q, quantity(t)$, $eff\Delta Y, quality(t)$ and $eff\Delta X_{bio}(t)$.

Keywords – Urban drainage, Compensatory techniques, Biorretention

1. INTRODUÇÃO

Historicamente, a drenagem urbana no Brasil esteve focada no tratamento hidráulico para a condução do escoamento superficial, resultando na conceituação de sistemas de drenagem baseados em condutos, conforme destacado por Pompêo (2000). A partir da década de 90, os centros de pesquisa brasileiros em drenagem urbana buscaram adaptar as chamadas Técnicas Compensatórias - TCs para compensação dos efeitos da urbanização sobre o escoamento superficial, cuja revisão e tipologia são discutidas por Baptista et al. (2005). Essas experiências foram adaptações de técnicas desenvolvidas por grupos de pesquisa da Europa, Estados Unidos e Austrália. Atualmente, estes conceitos provocam uma reflexão e uma mudança de paradigmas nos novos Planos Diretores

¹ * Doutorando no PPG-SHS/EESC/USP, altairrosa@yahoo.com.br

² Professor do Depto. Hidráulica e Saneamento, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo (SHS/EESC/USP), emm@sc.usp.br

³ Professor do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas, vcaramori@yahoo.com

Urbanos com abordagens experimentais e adaptativas que receberam variadas denominações, como *Best Management Practices-BMP*, *Sustainable Urban Drainage Systems-SUDS*, *Water Sensitive Urban Drainage-WSUD* e *Low Impact Development-LID*.

Neste sentido é possível observar que essas novas abordagens tratam, basicamente, dos mesmos princípios e dos mesmos tipos de soluções, sejam estas com medidas estruturais e/ou não-estruturais. Segundo Fletcher et al. (2012), as novas abordagens priorizam princípios de infiltração induzida, retenção, (bio) filtração do escoamento superficial, controle na fonte de geração dos escoamentos, integração paisagística com espaço urbano, não transferência de impactos para jusante e abordagem multidisciplinar com educação ambiental e participação social. Em resumo, todos os conceitos se relacionam à manutenção das condições urbanas o mais próximo possível das condições naturais do ciclo hidrológico (quali-quantitativo), buscando integrar eficiências de quantidade (volumes armazenados, vazões de pico atenuadas, retardamento de tempos de escoamento) e de qualidade da água (considerando a poluição difusa, com aspectos físico-químico, micro-biológicos e ecotoxicológicos).

No entanto, apesar de duas décadas de desenvolvimento de TCs no Brasil, observa-se pouca incorporação prática das soluções desenvolvidas, especialmente na escala onde elas têm sido pesquisadas. Os principais motivos são movidos pela escala dos problemas de drenagem: (i) há preferência por reservatórios de detenção na macrodrenagem (CANHOLI, 2005), pela falta de requalificação técnica dos órgãos gestores da drenagem para lidar com implantação, operação e manutenção de estruturas difusas, descentralizadas e de pequeno porte; (ii) a sociedade tem dificuldade de entender a relação entre soluções de pequena escala e problemas em grande escala: as pesquisas experimentais estiveram focadas no controle na fonte em escala de lote (ver Tabela 1), enquanto os problemas urbanos de drenagem se revelam em grande escala.

Tabela 1- Histórico recente das pesquisas experimentais no Depto de Hidráulica e Saneamento da EESC/USP sobre Técnicas Compensatórias (TCs) para controle da poluição difusa da drenagem urbana.

Ano	Escala	T.C.	Compensação	Entrada	Dados e Referência
2003	Lote exp.	CVL	ΔP	Exp/Nat.	[1] Cunha (2004)
2005	Lote exp.	Trin	ΔPe	Exp/Cont.	[2] Graciosa (2005)
2008	Lote resid.	CVL, Trin, PProf	ΔP , ΔPe , $\Delta QualPe$	Exp/Nat.	[3] Ohnuma Jr (2008)
2009	Lote resid.	CVL	ΔP , ΔPe , $\Delta QualPe$	Exp/Nat.	[4] Vasconcelos (2009)
2009	Lote exp.	Trin	ΔPe	Exp/Cont.	[5] Lima (2009)
2011	Micro-dren.	Trin, Mini-Res	ΔPe	Mod/IDF	[6] Shiratsubaki (2011)
2012	Lote resid.	Trin, Mini-Res	ΔPe	Mod/IDF	[7] Kawatoko (2012)
2012	Lote resid.	CVL	ΔP , ΔPe , $\Delta QualPe$	Exp/Nat.	[8] Galavoti (2012)
2012-	Micro-dren.	Biorretenção	ΔPe , $\Delta QualPe$, MUWS	Exp/Nat.	[9] MAPLU/FINEP, [10] FAPESP IAV, [11] Casadinho/PROCAD (UFAL+EESC/USP)

Legendas: "T.C.": CVL: Cobertura Verde Leve (telhado verde), Trin: trincheira de infiltração, PProf: Poço Profundo de Recarga, Mini-Res: Mini-reservatório de detenção; "Compensação" de: ΔP : chuva incidente; ΔPe : incremento da chuva efetiva (escoamento superficial); $\Delta QualPe$: incremento da poluição difusa; MUWS: Microbiologia de Águas Urbanas (*Microbiology in Urban Water Systems*); "Entrada" Exp/Nat.: Lote experimental, entrada natural (não-controlada) de precipitação, Exp/Cont.: experimento com entrada controlada de precipitação, Mod/IDF: modelagem de área de drenagem para chuva de projeto (IDF local): (1) www.shs.eesc.usp.br/downloads/technotes/emmm/Ara-FAPESP-2004-Relat-final.pdf; (2) www.abrh.org.br/novo/rbrh_completas/RBRHV17N2Completa.pdf; (3) www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18139/tde-13032009-093755/en.php; (4) www.tcc.sc.usp.br/tce/disponiveis/18/180300/tce-19072010-112639/; (5) www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-24062009-081439/en.php; (6) em revisão editorial; (7) www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-23042012-090308/en.php; (8) www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-12042012-090452/en.php; (9) FINEP 01.10.0701.00 - MCT/FINEP/AÇÃO TRANSVERSAL Saneamento Amb. e Habitação 07/2009; (10) FAPESP IAV <http://www.bv.fapesp.br/pt/projetos-tematicos/29498/assessment-impacts-vulnerability-climate-change/>; (11) CNPq 552494/2011-9 MCT/CNPq/MEC/CAPES - Ação Trans 06/2011 - Casadinho/Procad (UFAL & EESC/USP).

Observa-se que ainda há uma grande lacuna na ligação dos parâmetros e metodologias de dimensionamento e análise de eficiência. Por exemplo, há dificuldade ao integrar variáveis de quantidade, cita-se vazão de pico e volume excedente, com variáveis de qualidade, cita-se concentração e cargas de poluentes, ou variáveis microbiológicas, como algas, bactérias e vermes. Isto dificulta o desenvolvimento das soluções integradas para a prática da drenagem.

2. HIPÓTESES E OBJETIVOS

Este trabalho está focado no desenvolvimento de metodologias e indicadores de eficiência de técnicas compensatórias, considerando: 1) em termos de quantidade e qualidade, quais efeitos de escala hidrológica que regem processos desde a parcela ou lote individual até a microdrenagem?; 2) como é realizada a integração desses efeitos quali-quantitativos estudando dispositivos experimentais conjugados de retenção e de biorretenção?; 3) de que maneira indicadores ec hidrológicos colaboram na explicação das mudanças de eficiência de dispositivos de retenção, sejam estes no controle da vazão de pico e de sedimentos, e de biorretenção com processos de infiltração e efeitos sobre parâmetros físicos, químicos e biológicos?

Considerando o estado da arte sobre TCs para controle de poluição difusa da drenagem urbana, as hipóteses desta pesquisa afirmam que: *a)* As técnicas compensatórias, se estudadas na forma de retenção conjugada com biorretenção, representam estratégias mais eficientes de adaptação para controlar alterações da drenagem urbana no longo prazo; *b)* Sob estes cenários, os planos diretores buscarão otimizar recursos e incorporar resiliência da drenagem, portanto as técnicas serão realmente compensatórias se incluírem etapas progressivas de reabilitação sistemática ou “modular”, para estender a eficiência durante sua vida útil, *c)* Os indicadores ec hidrológicos são ferramentas que avaliam como esta eficiência generalizada é estendida, e de que maneira quantidade, qualidade e microbiologia da poluição difusa caracterizam melhor a drenagem urbana se abordadas de forma experimental e adaptativa.

3. O ESTADO DA ARTE NO USO DE TCs

No que se refere à escala espacial de análise, Marsalek e Schreier (2009) mostram que a inovação em drenagem urbana, saindo da abordagem tradicional para abordagens compensatórias no sentido amplo, deve considerar três escalas de trabalho: (1) escala de lote individual; (2) escala de microdrenagem (ou micro-bacia); (3) escala de macrodrenagem. Cada escala tem foco específico para o controle de parâmetros de quantidade e de qualidade da água.

3.1 Técnicas compensatórias de micro-escala (escala de lote)

As técnicas compensatórias de micro-escala têm ampla faixa de dimensionamento e características técnicas. As trincheiras de infiltração e pavimentos permeáveis recebem especial atenção em trabalhos recentes de Chahar et al. (2012), Coughlin et al. (2012), e no Brasil estudados por Silva et al. (2009). Nesse contexto, diversos trabalhos têm sido desenvolvidos na EESC/USP nos últimos 10 anos, considerando diferentes técnicas de controle na fonte e diferentes parâmetros de dimensionamento, conforme pode ser observado na Tabela 1.

3.2 Técnicas compensatórias de micro-drenagem

A partir de princípios de SUDS, vários autores, como Scholz & Yang (2010) abordam a hidrologia, geomorfologia, ecologia e oportunidades de pesquisas em rios urbanos. Também Benzerra et al. (2012) pesquisam SUDS visando os sistemas de suporte à decisão (SSD) para seleção de políticas sustentáveis para as águas urbanas, inclusive a drenagem. Por outro lado, Elliott & Trowsdale (2007) revisam modelos apropriados para avaliar LID e SUDS.

No Brasil, Morihama et al. (2011) apresentam algumas das soluções integradas do controle da poluição difusa da drenagem urbana, e Silva et al. (2011) um caso de estudo com análise de cargas difusas de N-tot, DBO, TSS, de primeira lavagem (*first flush*), e seu enquadramento conforme normas vigentes da Resolução CONAMA 430. Também no Brasil, Souza et al. (2011) adaptam um modelo chuva-vazão para simular TCs com princípios de LID em sistemas de drenagem, e sob diferentes cenários de intervenção. Dietz (2007) inicia uma revisão sobre LIDs, com foco na qualidade d'água da drenagem urbana, mas com relações quantitativas. Por outro lado, Gunn et al. (2012) retoma esta revisão a partir de novos índices de impactos no uso do solo e de como as TCs contribuem para a recuperação do ciclo hidrológico urbano.

3.3 Biorretenção e LID com base ecohidrológica

A ecohidrologia, área que colabora com SUDS, envolve aspectos interdisciplinares. Abrange, por um lado, aspectos participativos, como proposto por Pataki et al. (2011) e busca, por outro lado, novas técnicas de biomonitoramento da drenagem urbana (LAFONT et al., 2010), com marcas biogenéticas na poluição difusa (SAUER et al., 2011), avaliando a atividade bacteriológica (ARAYA et al., 2003). Inclui limites ambientais em escalas aninhadas de bacias (MENDIONDO, 2008), uma redefinição de processos em áreas ribeirinhas (BURT et al., 2010).

Em trabalhos de Winston et al. (2011), os biofiltros tiveram destaque na discussão sobre como o dimensionamento destas TCs são suscetíveis aos critérios de parâmetros-chave que influenciam na eficiência e vida útil. Em geral, os dimensionamentos simples, baseados em um ou dois parâmetros, são mais baratos, porém com eficiência reduzida no curto prazo de operação. Em um caso aplicado em Alemanha, Dittmer & Schmitt (2011) apresentam como funcionam os processos de purificação por biofiltros para o tratamento do extravazamento de sistemas mistos de esgotos em uma bacia da Europa. Adotando as áreas úmidas artificiais (wetland) atuando com biofiltros, Calheiros et al. (2012) encontram remoções de até 80% para DQO e de até 90% da DBO, até 93% para P-tot e 90% de N-tot para esgotos com influência de cortumes.

As *wetlands* como biofiltros podem ter uma otimização de eficiência conforme as características de dimensionamento, como apontado por Hijosa-Valsero et al. (2010). Estes autores utilizaram macrófitas controladas por fluxo sub-superficial e avaliaram a remoção de cargas de entrada de TSS, DQO e DBO para uma concentração meta de saída de DQO = 25 mg/L. Em Austrália, Hatt et al. (2009) apontam remoção de nutrientes e sedimentos por biorretenção, com base em experimentos laboratoriais controlados. Os primeiros autores conseguem remoções de nutrientes, até 79% de N-Tot, até 85% de P-Tot e até 95% de SST, encontrando um valor ótimo de remoção para uma intervenção de biofiltro que representa em torno de 2% da área de captação.

4. INTEGRAÇÃO DE METODOLOGIAS E CRITÉRIOS PARA APLICAÇÃO DE TCs

A metodologia do projeto se divide em três partes: (1) a análise de cargas poluidoras, com ênfase em poluição difusa da drenagem urbana, (2) abordagem experimental de dimensionamento com detenção e biorretenção, e (3) abordagem adaptativa para cenários de longo prazo segundo vida útil das técnicas compensatórias.

4.2 Abordagem experimental com detenção e biorretenção

Crítérios e métodos serão introduzidos de forma unificada para o projeto de pesquisa. A prática de projetos de obras pluviais de pequeno porte, denominadas de medidas ou técnicas compensatórias TCs, exige métodos simples e confiáveis no pré-dimensionamento e manutenção (SILVEIRA & GOLDENFUM, 2007). Em especial para não tornar complexo um estudo de alternativas que, muitas vezes, pode envolver um arranjo com diversos dispositivos ou medidas de controle (TCs). Esta pesquisa estudará a generalização de eficiências de TCs de acordo com efeitos de detenção (ΔQ_{quanti} , ΔY_{quali}) e biorretenção (ΔX_{bio}) para controle da poluição difusa da drenagem urbana conforme variações temporais durante a vida útil da obra $t = \{1, 2, \dots, N\}$. Estas eficiências apresentam-se da forma ponderada das eficiências específicas, e que o volume total da técnica compensatória $V_{\text{max,TC}}(t)$ é obtido pela adição de volumes de detenção e biorretenção para atender essas eficiências diferenciadas da forma:

$$\begin{aligned} eff_{TC}(\theta, t) &= \lambda_1 \cdot eff_{\Delta Q, \text{quanti}} + \lambda_2 \cdot eff_{\Delta Y, \text{quali}} + \lambda_3 \cdot eff_{\Delta X, \text{bio}}; \text{ para } \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 = 1 \\ V_{\text{max,TC}}(t) &= V_{\text{max,quanti}}(t) + V_{\text{max,quali}}(t) + V_{\text{max,bio}}(t) \\ \theta &= \theta(\underbrace{\Delta Q_{\text{quanti}}(t)}_{\text{detenção}}, \underbrace{\Delta Y_{\text{quali}}(t)}_{\text{detenção}}, \underbrace{\Delta X_{\text{bio}}(t)}_{\text{biorretenção}}) \end{aligned}$$

Os pesos de cada eficiência individual poderão assumir valores constantes ou variáveis durante a vida útil da obra e em conformidade com os intervalos de remoção de cada variável. O manual de WSUD (MELBOURNEWATER, 2003) apresenta frações de eficiência de remoção de poluentes. Para uma área de drenagem de 1000 m², um sistema de biorretenção de 20 m² de área (2% da área de captação) alcança até 99% de eficiência, enquanto uma área úmida construída (*wetland* artificial) de igual tamanho alcançaria 91% de eficiência, e uma vala de infiltração (*swale*) alcança eficiência de 20%. No entanto, se comparadas as eficiências de remoção entre biorretenção e *wetlands* artificiais, nota-se que as diferenças não são uniformes.

4.2.1 Dimensionamento por detenção de escoamento ($V_{\max, \text{quanti}}$, $\text{eff}\Delta Q_{\text{quanti}}$)

Para efeitos de cálculo, definem-se as seguintes variáveis de massa em função do tempo: H_E lâmina d'água de entrada acumulada medida sobre a área em planta da TC, e H_S a lâmina d'água de saída acumulada, também medida sobre a área em planta da TC. O volume máximo de pré-dimensionamento desta TC é expresso por um conjunto de equações com solução conjunta (SILVEIRA & GOLDENFUM, 2007):

$$H = \frac{V_{\max, \text{quanti}}}{\eta} = \left(\sqrt{\frac{a}{60} \beta \cdot T^{b/2}} - \sqrt{\frac{c}{60} \gamma \cdot q_s} \right)^2$$

$$i = \frac{a \cdot T^b}{t_r + c}; \quad \beta = \frac{C \cdot A}{B \cdot L}; \quad q_s = q_{\text{pre}} + \alpha \cdot K_{\text{sat}};$$

$$\text{eff}\Delta Q_{\text{quanti}} = \frac{\Delta P_e - q_s \cdot t_r}{\Delta P_e} \quad (\text{Eq 5})$$

Sendo: $V_{\max, \text{quanti}}$ o volume de pré-dimensionamento (mm) para mitigação do excesso da drenagem urbana ΔP_e ; a , b e c são os parâmetros da equação IDF, i é a intensidade da chuva (mm h⁻¹), T é o período de retorno (anos), t_r a duração da chuva (min), q_s é a vazão de saída do dispositivo (mm h⁻¹), A é a área contribuinte ao dispositivo, C é o coeficiente de escoamento da área de contribuição, L e B representam as dimensões de comprimento e largura do dispositivo (m), η é a porosidade do material de enchimento do dispositivo, γ é a razão entre a área de percolação e volume do dispositivo (mm), β é o produto do coeficiente de escoamento pela razão entre a área contribuinte e a área do dispositivo, K_{sat} é a condutividade hidráulica saturada do solo (mm h⁻¹), α é um coeficiente redutor da eficiência da infiltração devido à colmatagem e q_{pre} é a vazão de restrição, conforme uma vazão ambiental ou de pré-desenvolvimento estabelecida no Plano Diretor de Drenagem.

4.2.2 Dimensionamento por detenção de cargas poluidoras ($V_{\max, \text{quali}}$, $\text{eff}\Delta Y_{\text{quali}}$)

Os parâmetros de qualidade são incorporados aos de quantidade conforme metodologia proposta por AKAN & HOUGHTALEN (2003) e Hatt et al. (2009). A hipótese aborda o pré-dimensionamento conforme o tempo de detenção $t_{\text{TSS-quali, IN}}$ do transporte mássico de sólidos oriundos da poluição difusa da drenagem urbana e o tempo de evacuação da TC, $t_{\text{TSS-quali, OUT}}$ que estabelecem um volume extra, $V_{\max, \text{quali}}$. AKAN & HOUGHTALEN (2003) e Hatt et al. (2009) discutem as relações entre $V_{\max, \text{quali}}$ e o tamanho e tipo da estrutura de saída da TC, conforme o conjunto de equações:

$$V_{\text{quali}} = b_{\text{quali}} \cdot h^{c_{\text{quali}}}$$

$$P = \frac{k_o a_o \sqrt{2g}}{i_p} \left(\frac{i_p \cdot t_p}{b_{\text{quali}}} \right)^{0,5/c_{\text{quali}}} \quad (\text{orifício de saída})$$

$$P = \frac{k_w L \sqrt{2g}}{i_p} \left(\frac{i_p \cdot t_p}{b_{\text{quali}}} \right)^{1,5/c_{\text{quali}}} \quad (\text{vertedor de saída}) \quad (\text{Eq. 6})$$

$$W = \frac{w_{90}}{t_p}; \quad R = \frac{r_{90}}{t_p}; \quad S_d = \frac{V_{\max, \text{quali}}}{i_p \cdot t_p}; \quad t_{\text{retenção}(j)} = \frac{V_{\max, \text{quali}}}{u_{STT(j)}}$$

$$\text{eff}_{\Delta Y, \text{quali}} \cong \text{eff}_{\text{remoção}90\% \Delta Y} = 0,9 \sum_{j=1}^{N_{\text{ms}}} \frac{t_{\text{retenção}}}{t_{\text{retenção}(j)}}$$

Sendo: V_{quali} e $h^{c_{\text{quali}}}$ respectivamente o volume e lâmina d'água de detenção para controle da qualidade da drenagem, medida acima da estrutura da saída; c_{quali} e b_{quali} representam parâmetros; k_o é o coeficiente adimensional de descarga de orifício; a_o é a área do orifício, g a aceleração gravitacional, i_p a descarga máxima da entrada do escoamento, t_p o tempo da descarga máxima, k_w o coeficiente adimensional de descarga, L é a largura da crista de vertedor, w_{90} é o período de tempo no qual ao menos 90% do escoamento será detido na TC, r_{90} é o tempo até o qual 90% do escoamento será evacuado da TC, $V_{\max, \text{quali}}$ é o máximo volume de água que será armazenado na TC; $t_{\text{retenção}}$ é o tempo requerido para retenção de sólidos suspensos totais, $t_{\text{retenção}(j)}$ é o tempo de detenção requerido, e $u_{STT(j)}$ é a velocidade de decantação da j -ésima fração do total de sólidos suspensos, e $\text{eff}_{\text{remoção}90\% \Delta Y}$ representa

a eficiência de remoção geral de 90% da carga de poluição difusa por transporte de sólidos suspensos.

4.2.3 Dimensionamento com biorretenção ($V_{\max, \text{bio}}$, $\text{eff}_{\Delta X, \text{bio}}$)

Para uma série de poluentes (MCAULEY, 2009), a eficiência do sistema projetado do *Technical Design Guidelines*, expressa-se por:

$$L_{\text{bio}} = \frac{Q_{\max, \Delta P_e}}{h_{\max} \left(\frac{B_{h, \text{alagado}}}{t_c} + \frac{K_s \cdot B_{h, \text{alagado}}}{d_{\text{biofiltro}}} \right)}$$

$$f_{\max, \text{bio}} = K_s \cdot L_{\text{bio}} \cdot B_{\text{bio}} \cdot \frac{h_{\max} + d_{\text{biofiltro}}}{d_{\text{biofiltro}}}$$

$$T_{\text{biorretenção}} = \frac{L_{\text{bio}}}{f_{h=0,5h_{\max}}} \cdot (\phi \cdot B_{\text{bio}} + B_{h, \text{alagado}} \cdot h_{\max}) \quad (\text{Eq. 7})$$

$$\text{eff}_{\Delta X, \text{bio}} = 1 - \left[1 + \frac{1}{n} \frac{u_{\text{STT}}}{Q_{\max, \Delta P_e} / A_{\text{bio}}} \frac{(h_{\text{STT}} + h_{\max})}{(h_{\max} + h_{\text{meta}})} \right]^{-n}$$

Sendo: L_{bio} o comprimento da zona de biorretenção na TC, $Q_{\max, \Delta P_e}$ é a máxima taxa de descarga que ingressa na zona de biorretenção, conforme o incremento de lâmina de escoamento superficial, $B_{h, \text{alagado}}$ e B_{bio} representam, respectivamente, a largura média da área transversal alagada na zona de biorretenção e largura da zona de biorretenção, K_s é a condutividade hidráulica saturada do solo, h_{\max} representa a máxima lâmina de alagamento acima da zona de biorretenção, $d_{\text{biofiltro}}$ é a profundidade da biofiltro, t_c é o tempo de concentração da área de drenagem da micro-bacia afluente à TC, $f_{h=0,5h_{\max}}$ representa a taxa de infiltração para altura de água igual à metade da lâmina máxima de alagamento, ϕ representa a porosidade do solo; n representa um parâmetro hidráulico empírico de turbulência proposto por Fair & Geyer (1954), e que para fins de pré-dimensionamento adota-se próximo a 1,33 (PGC, 2009, p. 47); a eficiência da biorretenção $\text{eff}_{\Delta X, \text{bio}}$ depende da taxa de carga hidráulica, definida como o quociente entre $Q_{\max, \Delta P_e}$ e A_{bio} , da h_{STT} que é a profundidade de colmatação sobre o biofiltro, e h_{meta} que é a profundidade intermediária para atender a meta de remoção de cargas poluentes via biofiltro de alagamento. A vantagem de utilizar as equações de biorretenção é a incorporação de parâmetros como tempo de concentração da bacia e critérios hidráulicos para o regime sob o qual será dimensionada a TC.

4.3 Abordagem adaptativa na vida útil da técnica compensatória

A hipótese da pesquisa trata de como as TCs podem ser usadas como dispositivos de adaptação de longo prazo. Isto é, modificando (1) as curvas de demanda da drenagem urbana com variações $\Delta Q_{\text{quanti}}(t)$, $\Delta Y_{\text{quali}}(t)$ e $\Delta X_{\text{bio}}(t)$, e (2) modificando a capacidade do sistema $V_{\max, \text{TC}}(t)$, conforme a Figura 1. Portanto, as eficiências de controle $\text{eff}_{\Delta Q, \text{quanti}}(t)$, $\text{eff}_{\Delta Y, \text{quali}}(t)$ e $\text{eff}_{\Delta X, \text{bio}}(t)$ de forma combinada ou individual, incidem nas formas das curvas de capacidade. Esta abordagem adaptativa incorpora a modelagem quali-quantitativa do processo chuva-vazão em escalas de áreas de captação onde serão implantadas as TCs de acordo com: **(a)** detenção para controle de sedimentos, que atua na curva de capacidade da biorretenção, reduzindo sua declividade e aumentando sua vida útil; **(b)** as TCs atuam na curva de demanda, reduzindo o impacto da urbanização sobre o escoamento superficial, tanto em quantidade como na qualidade, e **(c)** se considerada uma demanda crescente, em função do uso urbano de novas áreas, a reabilitação do sistema com TCs pode ser feita através da implantação de novos dispositivos, da recuperação de dispositivos antigos ou da ativação de novas parcelas dos dispositivos, ainda não usados em sua plena capacidade.

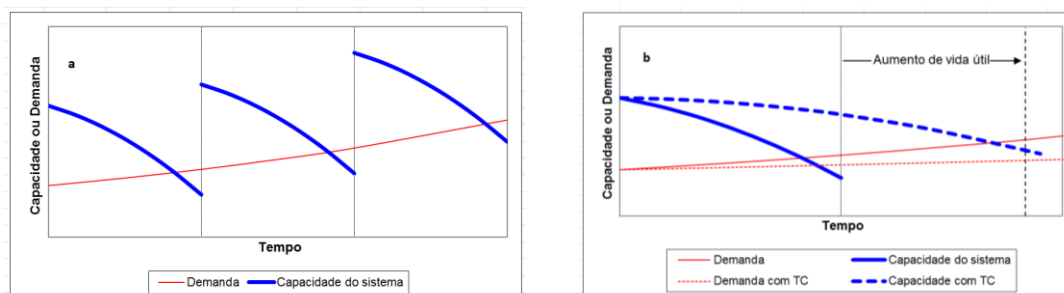


Figura 1 – Tratamentos para eficiência de sistemas de drenagem. (a): demanda e capacidade variáveis com política reativa (adaptado de Cordero, 2012); (b): demanda e capacidade variáveis com uso de TCs, ação pró-ativa com abordagem adaptativa (este projeto)

5. A ANÁLISE DOS RESULTADOS

A análise de resultados de eficiência generalizada $eff_{TC}(\theta, t)$ pode ser abordada com base em matrizes ecoidrológicas propostas por vários autores, tais como Mendiondo (2008) e Pataki et al. (2011). Em novas TCs podem ser monitorados episódios de chuvas com variáveis de qualidade de DQO, DBO, N-tot, P-tot, índices microbiológicos IB, frações de sólidos suspensos orgânicos, inorgânicos e totais (Tabela 2) e aspectos microbiológicos. O projeto Casadinho/CNPq/CAPES UFAL-EESC/USP (vigência 2012-2014) possibilita esta abordagem.

Tabela 2- Relações experimentais previstas entre variáveis para controle da poluição difusa na microdrenagem (linhas) com base em indicadores ecoidrológicos (colunas). Fonte: adaptado de Mendiondo (2008)

	Continuidade					Diversidade			Dinâmica		Resiliência				Vulnerabilidade			
	X ₁	X ₂	X ₃	X ₄	X ₅	X ₆	X ₇	X ₈	X ₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	X ₁₅	X ₁₆	X ₁₇	X ₁₈
DQO	+	+	+	+	-	+/-	+/-	+	+	+	-	+/-	+/-	+/-	-	+/-	+/-	+/-
DBO	+	+	+	+	+/-	+/-	+/-	+	+	+	-	+/-	+/-	+/-	-	+/-	+/-	+/-
N-tot	+/-	+/-	-	-	-	+/-	+/-	+	-	-	+/-	+/-	+/-	+/-	+/-	+	++	+/-
P-tot	+/-	+/-	-	-	-	+/-	+/-	+	-	-	+/-	+/-	+/-	+/-	+/-	++	++	+/-
IBiol.	+/-	+/-	+	+	-	+/-	+/-	+/-	+	+	+/-	+/-	+/-	+/-	+/-	+	+	+/-
SSI	+	+	+	+	-	+/-	+/-	+	+	+	-	+/-	+/-	+/-	-	+	++	+/-
SSO	+	+	+	+	-	+/-	+/-	+	+	+	-	+/-	+/-	+/-	-	+	+	+/-
SST	+	+	+	+	--	+/-	+/-	+	++	--	--	+/-	+/-	+/-	-	++	++	+/-

Legenda: sinal indica a correlação experimental esperada e o intervalo do coeficiente de determinação (R^2); ++: correlação positiva e $R^2 > 0,8$; +: correlação positiva e $0,5 < R^2 < 0,8$; +/-: sem correlação e $R^2 < 0,5$; -: correlação negativa e $0,5 < R^2 < 0,8$; --: correlação negativa e $R^2 > 0,8$;

De acordo aos cenários de poluição difusa da drenagem no Plano Diretor Urbano, a base ecoidrológica para análise de resultados de $eff_{TC}(\theta, t)$ segue dois critérios. O primeiro inclui variabilidades no clima como forças motrizes de acordo com: temperatura $\Delta T(t)$, da umidade relativa $\Delta UR(t)$, de precipitação $\Delta P(t)$ e da curva IDF local, $\Delta IDF(t)$. Este tipo análise podem ser realizadas com dados de cenários futuros (p.ex. Projeto Temático FAPESP IVA, Marengo, 2010) para horizontes futuros, $t = \{2025, 2050, 2100\}$. O segundo incorpora mudanças no uso e ocupação do solo como forças motrizes, que incorrem em mudanças nas áreas que geram cargas específicas de poluição difusa, $Y(A+\Delta A)$. Estes critérios aparecem simplificados mas para o período 2000-2100, os cenários globais A1, B2, A12 propostos pelo IPCC e adaptados pela Avaliação Ecosistêmica do Milênio (MEA, 2005), são adaptados em dois macro-cenários.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio dos projetos: (1) MAPLU2 – Manejo de Águas Pluviais no Meio Urbano/FINEP, (2) Projeto Temático 2008/15161-1 FAPESP “Assessment of Impacts and Vulnerability to Climate Change in Brazil and Strategies for Adaptation Options”, (3) Casadinho/PROCAD CNPq 552494/2011-9 (UFAL-EESC/USP) “Monitoramento avançado de processos biotecnológicos e qualidade ambiental”, e (4) CNPq PQ 307637/2012-3 de Produtividade científica.

REFERÊNCIAS

- AKAN, O & HOUGHTALEN, R (2003) *Urban hydrology, Hydraulics & Stormwater Quality: Engineering Application and Computer Modelling*, Hoboken, J Wiley
- ARAYA, R.; et al (2003) Bacterial activity and community composition in stream water and biofilm from an urban river determined by fluorescent in situ hybridization and DGGE analysis, *FEMS Microbiology Ecology*, 43:111-119.
- BAPTISTA, Márcio B.; NASCIMENTO, Nilo O.; BARRAUD, Sylvie. 2005. *Técnicas Compensatórias em drenagem urbana*. Porto Alegre: ABRH, 266p.
- BENZERRA, A; et al (2012) Decision support for sustainable urban drainage system management: A case study of Jijel, Algeria, *J. Environ. Mgnt.*, 101: 46–53.
- BURT, T., G. PINAY, S SABATER (2010) What do we still need to know about the ecoidrology of riparian zones?, *Ecoidrology* 3(3): 373-377.

- CALHEIROS, C. S. C.; *et al.* (2012) Use of constructed wetland systems with *Arundo* and *Sarcocornia* for polishing high salinity tannery wastewater. *Jl of Envir. Management*, 95 (1): 66–71.
- CANHOLI, A. P. (2005). *Drenagem Urbana e Controle de Enchentes*. São Paulo: Oficina de Textos.
- CHAHAR, Bhagu R.; GRAILLOT, Didier; GAUR, Shishir. (2012) Storm-Water Management through Infiltration Trenches. *J. Irrig. Drain Eng.* ASCE – American Society of Civil Engineers. Vol. 138. 274-281p.
- COUGHLIN, J. P.; CAMPBELL, C. D.; MAYS, D. C. (2012) Infiltration and Clogging by Sand and Clay in a Pervious Concrete Pavement System. *J. Hydro. Eng.*. ASCE – American Society of Civil Engineers. V. 17. 68-73.
- DIETZ, M (2007) Low Impact Development Practices: A Review of Current Research and Recommendations for Future Directions, *Water Air Soil Pollut* 186:351–363
- DITTMER, U.; SCHMITT, T. G. (2011) Purification Processes in Biofilter Systems for CSO Treatment, In: *Proceedings of 12th International Conference on Urban Drainage*, Porto Alegre/Brazil, 11-16 September 2011.
- ELLIOTT, A. H.; TROWSDALE, S. A. (2007) A review of models for low impact urban stormwater drainage, *Environmental Modelling & Software* 22: 394–405.
- FLETCHER, T.D., ANDRIEU, H., HAMEL, P. (2012) Understanding, management and modelling of urban hydrology and its consequences for receiving waters: A state of the art, *Advances in Wat. Res.* (in press)
- GUNN, R., Martin, A., Engel, B & L. Ahiablame (2012): Development of two indices for determining hydrologic implications of land use changes in urban areas, *Urban Water Journal*, 9:4, 239-248
- HATT, B; FLETCHER, T.; DELETIC, A (2009) Hydrologic and pollutant removal performance of stormwater biofiltration systems at the field scale, *Journal of Hydrology* 365 (3–4): 310–321
- HIJOSA-VALSERO, M.; SIDRACH-CARDONA, R.; MARTÍN-VILLACORTA, J.; BÉCARES, E. (2010) Optimization of performance assessment and design characteristics in constructed wetlands for the removal of organic matter. *Chemosphere*, 81 (5), p. 651–657.
- LAFONT, M.; JÉZÉQUEL, C.; VIVIER, A.; BREIL, P.; SCHMITT, L.; BERNOUD, S. (2010) Refinement of biomonitoring of urban water courses by combining descriptive and ecohydrological approaches, *Ecohydrology & Hydrobiology* 10(1): 3-11
- MARSALEK, J.; SCHREIER, H. (2009) Innovation in Stormwater Management in Canada: The Way Forward, *Water Quality Res. J of Canada*, 44 (1), p. v-x
- MEA (Millenium Ecosystem Assessment) (2005) Exosystems and human well-being: A synthesis. Island Press, Washington, D.C.
- MELBOURNEWATER (2003) WSUD Technical Manual Scoping Study. Disponível em http://www.melbournwater.com.au/content/library/wsud/wsud_technical_manual.pdf. Acesso em outubro de 2012.
- MENDIONDO, E. M. (2008) Challenging issues of urban biodiversity related to ecohydrology. *Braz J Biol.* 68(4 Suppl):983-1002.
- MORIHAMA, C. D.; *et al* (2011) Integrated solutions for urban runoff pollution control in Brazilian metropolitan regions. In: *Proceedings of 12th Int. Conference on Urban Drainage*, Porto Alegre/Brazil, 11-16 September 2011.
- PATAKI, D. E.; *et al* (2011) Socio-ecohydrology and the urban water challenge, *Ecohydrology*, 4(2): 341–347.
- POMPÊO, César A. (2000). Drenagem Urbana Sustentável. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 5(1): 15-23.
- SAUER, E. P.; *et al.* (2011) Detection of the human specific *Bacteroides* genetic marker provides evidence of widespread sewage contamination of stormwater in the urban environment, *Water research*, 45(14):4081-4091
- SCHOLZ, M; YANG, Q. (2010) Guidance on variables characterising water bodies including sustainable flood retention basins, *Landscape & Urban Planning* 98: 190-199
- SILVA, B. L.; MOREIRA, T.; KOIDE, S.; CAMPANA, N. A. (2009) Avaliação da infiltração em revestimentos com superfícies permeáveis. Fundación para el Fomento de La Ingeniería del Agua. *Revista Ing del Agua*, v. 16 (3), p. 1-10
- SILVA, J. B.; *at al.* (2011) Urban runoff quality from the Cabaça stream basin. In: *Proceedings of 12th International Conference on Urban Drainage*, Porto Alegre/Brazil, 11-16 September 2011.
- SILVEIRA, André L. L.; GOLDENFUM, Joel A. (2007). Metodologia Generalizada para Pré-Dimensionamento de Dispositivos de Controle Pluvial na Fonte. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 12 (2): 157-168.
- SOUZA, C. F.; CRUZ, M.A.S.; TUCCI, C.E.M. (2011) Adapting a rainfall-runoff model to simulate LID stormwater systems In: *Proceedings of 12th Int. Conference on Urban Drainage*, Porto Alegre/Brazil, 11-16 September 2011.
- WINSTON, R. J.; LUELL, S.K.; HUNT, W. F. (2011) Evaluation of Undersized Bioretention for Treatment of Highway Bridge Deck Runoff, In: *Proceedings of 12th International Conference on Urban Drainage*, Porto Alegre/Brazil, 11-16 September 2011.