

## Artigo Técnico

# Critérios de projeto e benefícios esperados da implantação de técnicas compensatórias em drenagem urbana para controle de escoamentos na fonte, com base em modelagem computacional aplicada a um estudo de caso na zona oeste do Rio de Janeiro

*Design criteria and expected benefits due to the implementation of compensatory techniques on urban drainage to control on source urban stormwater runoff, based on computer modeling applied to a case study in the west zone of Rio de Janeiro*

Anaí Floriano Vasconcelos<sup>1</sup>, Marcelo Gomes Miguez<sup>2</sup>, Elaine Garrido Vazquez<sup>3</sup>

## RESUMO

O processo de urbanização resulta em alterações no ciclo hidrológico prejudiciais à população. Para amenizar esses efeitos, as técnicas compensatórias em drenagem urbana visam à maior sustentabilidade hidrológica na expansão urbana. Nesse sentido, este artigo teve como objetivos avaliar, por meio de modelagem computacional, o efeito da adoção dessas técnicas na escala de lote e da bacia hidrográfica e avançar com diferentes possibilidades de concepção de projeto. A modelagem foi realizada para diversos cenários, considerando a implantação das técnicas de forma isolada e combinada. Os parâmetros utilizados na modelagem visaram verificar possibilidades extremas de aplicação, de modo a disponibilizar dados para balizamento de projetos reais. As chuvas avaliadas possuem variadas durações e intensidades, facilitando a extrapolação dos resultados deste trabalho para bacias hidrográficas de diferentes escalas. Os resultados das simulações indicam potenciais benefícios na drenagem urbana oriundos do uso dessas técnicas no lote, com mais efetividade para as menores chuvas de projeto. Esse foi o caso dos cenários que avaliaram os jardins rebaixados isoladamente ou combinados em série com um reservatório de lote e os cenários de pavimentos permeáveis na calçada que receberiam o escoamento superficial do lote adjacente. Também foi verificado que a combinação paralela de um reservatório de lote com as dimensões propostas pela legislação municipal e um jardim rebaixado em 0,07 m seria capaz de neutralizar, hidrológicamente, os impactos da ocupação do lote para todas as chuvas de projeto analisadas, entretanto o reservatório proposto pela legislação municipal, quando adotado isoladamente, quase não atuou na escala da bacia.

**Palavras-chave:** técnicas compensatórias em drenagem urbana; drenagem urbana sustentável; controle de escoamento na fonte.

## ABSTRACT

The urbanization process results in detrimental changes in the hydrological cycle to the population. In order to mitigate these effects, compensatory techniques in urban drainage aim at increasing hydrological sustainability in urban expansion. In this sense, this paper intended to, through computer modeling, evaluate the effect of the adoption of these techniques on site scale and at the watershed scale, as well as to discuss different design concepts. The modeling was performed for different scenarios, considering the implementation of the techniques isolated and combined. The parameters proposed for modeling aimed to check the extreme possibilities for their application in order to make data available for actual projects. The rainfalls have been evaluated for different durations and intensities, thus facilitating the extrapolation of this study results for variable watershed scales. The modeling results pointed to potential benefits on the urban drainage due to the compensatory techniques adoption at the lot scale, with the property owner being capable to easily control the smaller design rainfalls. This was the case of the scenarios with raingardens isolated or combined in series with a lot reservoir or the scenarios where a permeable pavement on sidewalk received runoff from the adjacent lot. The parallel combination of a lot reservoir proposed by the municipal legislation and a raingarden with only 0,07 m depth would be capable of hydrologically neutralize the impacts of the occupation for all project rains analyzed. Nevertheless, the same reservoir proposed by the municipal legislation, when used isolatedly, showed little or none benefits on the basin scale.

**Keywords:** compensatory techniques in urban drainage; sustainable urban drainage; source urban stormwater runoff control.

<sup>1</sup>Mestre pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) - Rio de Janeiro (RJ), Brasil.

<sup>2</sup>Doutor pela UFRJ - Rio de Janeiro (RJ), Brasil.

<sup>3</sup>Doutora pela UFRJ - Rio de Janeiro (RJ), Brasil.

**Endereço para correspondência:** Anaí Floriano Vasconcelos - Rua Serafim Libaneo, 04 - Centro - 18245-970 - Caixa Postal: 64 - Campina do Monte Alegre (SP), Brasil - E-mail: anaivasconcelos@ufscar.br

**Recebido:** 26/02/15 - **Aceito:** 17/02/16 - **Reg. ABES:** 146469

## INTRODUÇÃO

O crescimento da urbanização sem o devido planejamento resulta em alterações nos processos hidrológicos, como aumento do escoamento superficial e diminuição da capacidade natural de retenção e infiltração no solo (DOUBLEDAY *et al.*, 2013; MARCHIONI; BECCIU, 2014; ELGA *et al.*, 2015). Isso acarreta diversos impactos sociais e ambientais, como o aumento da frequência de inundações e a redução da disponibilidade hídrica, por conta da contaminação das águas (VARGAS, 1999). Esses problemas são resultantes de ações descentralizadas na bacia e, portanto, devem também ser tratados nessa escala. Ahiablame *et al.* (2012) apontam uma preocupação crescente em tratar o problema perto da fonte geradora dos escoamentos, de modo a reduzir e retardar os picos de cheia e também de permitir a recarga do lençol freático.

Na busca por restaurar as condições de escoamento o mais próximo possível do existente antes da urbanização, as técnicas compensatórias em drenagem urbana ganharam importância. Tais técnicas podem ser consideradas soluções urbanísticas ambientalmente mais adequadas para o manejo das águas pluviais em áreas urbanizadas. Elas visam à redução do impacto do aumento da impermeabilização sobre os hidrogramas de cheias (ROY *et al.*, 2008). Apesar de amplamente utilizadas em alguns países, no Brasil, os conceitos e as metodologias de implantação e operação das técnicas compensatórias ainda são pouco conhecidos e difundidos. Também não existem políticas públicas universalizadas de incentivo à sua adoção.

Nesse sentido, o presente artigo pretendeu apresentar os resultados hidrológicos, resultantes de modelagem computacional, da adoção de técnicas compensatórias na escala do lote em diferentes configurações. Esses resultados podem ser utilizados para o incremento das pesquisas na área e fomento de políticas públicas relacionadas à drenagem urbana sustentável.

## METODOLOGIA

A área de estudo é um lote padrão de 600 m<sup>2</sup> situado no bairro de Guaratiba, município do Rio de Janeiro (MRJ). A área começou a ser alvo da expansão urbana da cidade e, segundo a legislação vigente (RIO DE JANEIRO, 1970; 1976; 1985; 2009), deve manter 30% de sua área permeável e no máximo 50% do terreno pode ser edificado. Nesse lote foram avaliados os resultados da adoção de telhado verde, reservatório de lote e jardim rebaixado, de forma individual e com as técnicas combinadas entre si. Além disso, foram estudadas possibilidades de adoção de pavimentos permeáveis na calçada na frente do lote, também individualmente ou em conjunto com outras técnicas.

As simulações computacionais foram realizadas com o auxílio do software Microsoft Excel para oito chuvas de projeto distintas, variando o tempo de recorrência (TR) (10 e 25 anos) e a duração (1, 3, 6 e 12 horas). Em todos os casos, aplicaram-se o princípio da conservação de massa

e a equação da continuidade. As variações das chuvas de projeto fazem com que as simulações contemplem resultados para micro e macrodrenagens. Elas abrangem as chuvas usualmente utilizadas para ambos os tipos de projeto (o TR mais baixo, nesse caso de 10 anos, associa-se à recomendação de projeto, da Fundação Instituto das Águas do Município do Rio de Janeiro — Rio-Águas —, para a microdrenagem no município do Rio de Janeiro, enquanto o TR de 25 anos segue a recomendação do Ministério das Cidades (BRASIL, 2012) para os projetos de macrodrenagem) e para diferentes escalas de bacias hidrográficas, uma vez que bacias de tamanhos diversos apresentam tempos de concentração distintos e esses tempos são adotados como tempos de duração críticos para a construção das curvas de projeto.

A chuva de projeto adotada foi construída com base na curva intensidade-duração-frequência (IDF) de Campo Grande (Equação 1), visto que o bairro de Guaratiba está inserido na área de influência da estação pluviométrica do posto de Campo Grande e cobre diferentes tempos de duração, para poderem ser avaliadas diversas configurações de projeto, para lotes em várias posições em uma bacia (mais a montante ou mais a jusante) ou em bacias diferentes de variados tamanhos.

$$i = \frac{aTR^b}{(t+c)^d} \quad (1)$$

Em que:

*i* = intensidade da chuva, em mm.h<sup>-1</sup>;

TR = tempo de recorrência, em anos;

*t* = tempo de duração da precipitação, em minutos;

*a*, *b*, *c*, *d* = coeficientes definidos de acordo com o posto pluviométrico que forneceu os dados para elaboração da curva.

No caso da estação de Campo Grande, esses coeficientes são os apresentados no Quadro 1.

O método racional, proposto inicialmente em 1850 por Lloyd-Davies, na Inglaterra, e em 1951 por Mulvaney, nos Estados Unidos, é largamente conhecido e utilizado para a conversão de chuva em escoamento superficial em pequenas bacias hidrográficas (CHOW *et al.* 1994; TOMAZ, 2013). Esse método foi utilizado para estimativa do escoamento superficial efluente dos lotes neste estudo. Os resultados dos cenários de técnicas compensatórias foram comparados com dois cenários de referência: i) lote antes da ocupação e ii) lote com ocupação convencional e drenagem tradicional. Quanto mais próximos do cenário

**Quadro 1** – Coeficientes da curva intensidade-duração-frequência (IDF) de Campo Grande, Guaratiba, Rio de Janeiro.

a	b	c	d
891,600	0,180	14,000	0,689

de pré-urbanização os resultados hidrológicos, mais eficiente foi considerada a adoção da técnica ou combinação de técnicas em questão.

Para a simulação das técnicas estudadas foram adotadas algumas hipóteses e parâmetros empíricos, baseados na literatura específica e relatados nos parágrafos a seguir.

Os volumes do reservatório de lote foram tomados como objeto de dimensionamento. A saída desse reservatório de lote dar-se-ia por um orifício de fundo, com vazão regulada pela Equação 2 (Resolução Conjunta da Secretaria Municipal de Governo, da Secretaria Municipal de Obras e da Secretaria Municipal de Urbanismo — SMG/SMO/SMU — n.º 001/2005) (PREFEITURA MUNICIPAL DO RIO DE JANEIRO, 2005) e por extravasamento, eventualmente. Essa equação também regula a saída de água pelo orifício de fundo do leito granular dos pavimentos permeáveis.

$$S = \frac{Q}{C_d \sqrt{2gh}} \quad (2)$$

Em que:

S = área do orifício, em m<sup>2</sup>;

Q = vazão de águas pluviais gerada na área drenada, anteriormente à impermeabilização, conforme as normas de drenagem urbana da SMO;

C<sub>d</sub> = coeficiente de descarga, correspondente a 0,61;

g = aceleração da gravidade, correspondente a 9,81 m.s<sup>-2</sup>;

h = carga sobre o centro do orifício, em m.

No caso do jardim rebaixado, foi considerada saída apenas por infiltração a uma taxa constante equivalente à condutividade hidráulica do solo à saturação (BAPTISTA *et al.*, 2005). Apesar de não levar em conta outras formas de eliminação de água do jardim, como a evapotranspiração (ET) e a variação de capacidade de infiltração do solo, que muda de acordo com o tipo de solo e suas condições iniciais, esse critério é o mais conservador possível, de modo a simular o pior cenário. Com base na literatura, a menor taxa de infiltração recomendada para a adoção de técnicas compensatórias com saída por infiltração é da ordem de 1,0 × 10<sup>-6</sup> m/s (TOMAZ, 2010), valor adotado neste estudo para todos os processos de infiltração dos jardins rebaixados e dos pavimentos permeáveis. Esse valor de taxa de infiltração, sendo o mais baixo recomendado pela literatura, visa avaliar a pior situação teórica de infiltração possível.

Além disso, não há estudos específicos que caracterizem o solo na região de estudo, e informações mais gerais sobre a região permitem supor que a faixa de variação desse parâmetro estaria entre 10<sup>-5</sup> e 10<sup>-6</sup> m/s. No caso dos pavimentos permeáveis, foi adotado leito granular de brita, com porosidade de 0,4 (TOMAZ, 2010). Esse parâmetro indica a capacidade de armazenamento de água no leito granular, para

posterior liberação pelo orifício de fundo e por infiltração. Entretanto é importante ter em vista que a altura do leito granular é limitada, para que não haja perda de suporte do pavimento. Levando em conta a Equação 3 (MARCHIONI; SILVA, 2011), a taxa base de infiltração e a porosidade consideradas, além do tempo máximo de armazenamento, de 72 horas, a altura máxima passível de ser adotada para o leito granular do pavimento permeável seria de 0,65 m. Esse limite também é relevante para não inviabilizar a escavação, por conta de seus elevados custos quando são necessárias escavações profundas.

$$h_{\max} = f \times \frac{T_s}{V_r} \quad (3)$$

Em que:

h<sub>máx</sub> = altura máxima do leito granular permitida para evitar perda de suporte do pavimento, em m;

f = coeficiente de permeabilidade do solo, em m.h<sup>-1</sup>;

T<sub>s</sub> = tempo máximo de armazenamento de água, recomendado de 72 h por Marchioni e Silva (2011);

V<sub>r</sub> = porosidade do agregado.

Para dimensionar a influência da implantação de um telhado verde no escoamento superficial efluente do lote, foi considerada a referência de Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e. V. (FLL, 2002), que apresenta relação entre a espessura do substrato do telhado, o tipo de vegetação e o percentual de retenção médio anual. Dessa forma, foram considerados nas simulações dois tipos de telhado verde: extensivo com 0,05 m de substrato e vegetação de sedum e forrageiras; e intensivo com 0,20 m de substrato e vegetação de grama e arbustos. As retenções de água expostas por FLL (2002) para essas configurações de coberturas verdes são de 45 e 60%, respectivamente. Apesar das diferenças climáticas entre a Alemanha, país de origem deste estudo, e o Brasil, Oliveira (2009) obteve 56% de retenção de águas pluviais em um telhado verde com substrato comercial com espessura de 10 a 15 cm no MRJ, valor semelhante ao dos estudos de FLL (2002), o que reforça a validade da hipótese adotada. As pequenas espessuras de substrato e o tipo de vegetação existente no Brasil visam minimizar custos e reduzir dificuldades de implantação e requisitos estruturais.

## RESULTADOS

Entre os diversos cenários de técnicas compensatórias estudados, alguns se destacaram por apresentarem resultados efetivos na redução de escoamentos, com diminuição da vazão de saída do lote de até 72%, como no caso do reservatório de lote da legislação municipal

combinado ao jardim rebaixado em paralelo. Enquanto isso, outros não corresponderam às expectativas de contribuição com o aumento da sustentabilidade da drenagem urbana, como o reservatório de lote da legislação quando adotado isoladamente, que não teve efeitos na redução de vazões de pico.

Como referência de desempenho para os cenários, foram consideradas as vazões de pico efluentes das áreas drenadas antes da urbanização e com a urbanização convencional, sem a adoção de nenhuma técnica compensatória. A urbanização convencional do lote resultaria em aumento da vazão de pico efluente em 2,17 vezes, o que significa que a vazão de pico pré-urbanização equivale a 46% da vazão de pico relativa à urbanização convencional. A proporção entre a vazão de pico com a adoção das técnicas compensatórias e a da urbanização convencional foi usada como indicador de eficiência do cenário. Quanto mais próximo de 0,46 for o indicador de eficiência de redução de vazão de pico, maior a capacidade da configuração

de técnicas proposta para aproximar as vazões efluentes da área drenada de seus valores pré-urbanização.

Por outro lado, se esse indicador tiver valor próximo a 1,00, a combinação de estruturas proposta mostra-se ineficiente em termos de redução das vazões de pico efluentes. O resumo dos resultados deste artigo com os respectivos indicadores de eficiência de redução de vazão de pico é apresentado no Quadro 2.

De modo geral, neste trabalho os reservatórios de lote se mostraram boas opções para a redução de vazões de pico efluentes do lote (apesar dos tamanhos necessários), conforme pode ser visto no Quadro 2. Para a recuperação das vazões de pico naturais efluentes do lote, os volumes de reservatório necessários variariam entre 11,5 e 14,2 m<sup>3</sup>, dependendo da chuva de projeto — valores bastante elevados para o tamanho do terreno. Por outro lado, o reservatório de lote proposto pela legislação municipal (RIO DE JANEIRO, 2004), que para o lote estudado seria de 4,4 m<sup>3</sup>, mostrou-se incapaz de reduzir as vazões de

**Quadro 2 - Resultados dos diferentes cenários de técnicas compensatórias apresentados.**

Descrição do cenário	Características das estruturas	Proporção entre a vazão de pico efluente no cenário e a vazão de urbanização convencional
Pré-urbanização	-	0,46
Urbanização convencional	-	1,00
Reservatório de lote para recuperar a vazão natural	Volume do reservatório: 11,5 a 14,2 m <sup>3</sup>	0,43 a 0,44
Reservatório de lote da legislação municipal	Volume do reservatório: 4,4 m <sup>3</sup>	1,00
Reservatório de lote e jardim rebaixado em série	Volume do reservatório: 1,4 a 12,7 m <sup>3</sup> Rebaixo do jardim: 0,10 m	0,47
Reservatório de lote da legislação municipal e jardim rebaixado em paralelo	Volume do reservatório: 4,4 m <sup>3</sup> Rebaixo do jardim: 0,05 a 0,07 m	0,28 a 0,33
Reservatório de lote e telhado verde intensivo em 20% do telhado	Volume do reservatório: 9,9 a 12,4 m <sup>3</sup>	0,44
Reservatório de lote e telhado verde intensivo em 50% do telhado	Volume do reservatório: 7,8 a 9,5 m <sup>3</sup>	0,44
Reservatório de lote da legislação municipal e telhado verde intensivo em 50% do telhado	Volume do reservatório: 4,4 m <sup>3</sup>	0,85
Jardim rebaixado na área permeável do lote para recuperar a vazão natural	Rebaixo do jardim: 0,12 a 0,26 m	0,31
Jardim rebaixado em 0,10 m na área permeável do lote	Rebaixo do jardim: 0,10 m	0,58 a 1,00
Telhado verde extensivo em 20% do telhado	-	0,96
Telhado verde extensivo em 50% do telhado	-	0,90
Telhado verde intensivo em 20% do telhado	-	0,94
Telhado verde intensivo em 50% do telhado	-	0,85
Pavimento permeável drena a própria área	Altura do leito granular: 0,10 a 0,13 m	0,36
Pavimento permeável na calçada drena a própria área e a do lote adjacente	Altura do leito granular: 1,06 a 1,34 m	0,41
Pavimento permeável na calçada drena a própria área e a do lote adjacente, que possui jardim rebaixado em 0,10 m em sua área permeável	Altura do leito granular: 0,15 a 1,27 m Rebaixo do jardim: 0,10 m	0,41

pico mesmo para a chuva de projeto de 1 hora e TR = 10 anos, que foi a menor estudada.

O extravasamento da estrutura ocorreu sempre antes do pico da chuva de projeto. Isso demonstra que a adoção do reservatório de lote recomendado pela legislação de forma individual não acarreta benefícios hidrológicos para a comunidade. No entanto, visando reduzir as dimensões dos reservatórios de lote necessários, foram também avaliados cenários com a combinação dessas estruturas com outras, como telhados verdes e jardins rebaixados.

A combinação com os jardins rebaixados apresentou bons resultados. Se instalados em série, de modo que o jardim rebaixado em 0,10 m na área permeável do lote receba toda a água escoada superficialmente pelo lote e, quando houver extravasamento, a água seja destinada para o reservatório de lote, o volume de reservatório necessário variaria de 1,4 a 12,7 m<sup>3</sup>. Para as chuvas mais longas, não é um valor muito menor do que se adotado apenas o reservatório de lote, o que não justificaria a instalação do jardim rebaixado. Um esquema dessa configuração é visto na Figura 1, de modo a facilitar a compreensão.

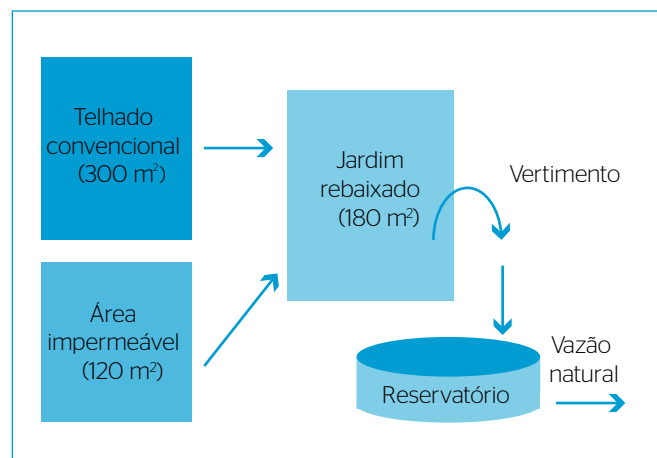
Todavia, se o reservatório proposto pela legislação (4,4 m<sup>3</sup>) receber a água escoada superficialmente pela área impermeável do lote e, quando o reservatório extravasar, o excedente for destinado para o jardim rebaixado, este teria de ter apenas 0,07 m de rebaixo para regular todas as chuvas de projeto estudadas, de maneira que saia do lote no máximo a sua vazão natural. Essa configuração está exposta na Figura 2.

No caso da combinação de reservatórios de lote com telhados verdes, o resultado da simulação apontou para uma pequena redução nos volumes de armazenamento necessários para os reservatórios, quando comparados com os volumes de armazenamento dos reservatórios no cenário de recuperação da vazão natural do lote que usa apenas o reservatório de lote. Tal fato se deve à retenção parcial da água precipitada pelo telhado verde. Essa combinação foi verificada apenas para os telhados verdes intensivos, em função do padrão do lote de estudo, que, a princípio, teria condições financeiras de construir um telhado um pouco mais oneroso, mas com mais benefícios hidráulicos. Dessa forma, se fosse implantado um telhado verde intensivo em 20% da área edificável do lote, os volumes de reservatório necessários seriam de 9,9 a 12,4 m<sup>3</sup>, o que significa redução média de 13,6% do volume do reservatório. Se o mesmo telhado verde fosse implantado em 50% da edificação, a redução média de volume do reservatório seria de 32,5%, com volumes de reservatórios previstos entre 7,8 e 9,5 m<sup>3</sup>, dependendo da chuva de projeto.

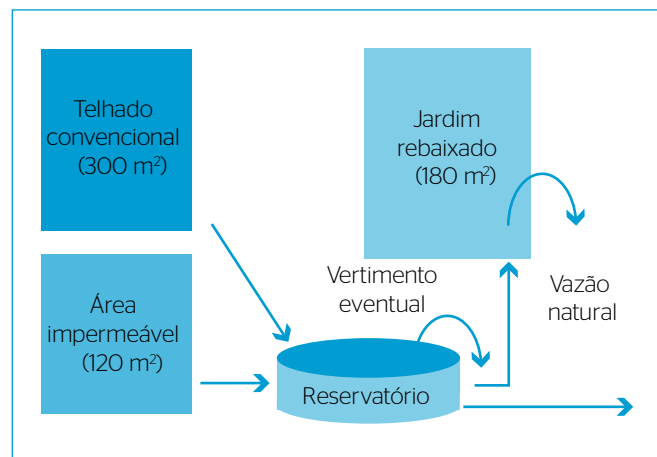
Uma característica interessante das combinações de reservatórios de lote e telhados verdes é que, para chuvas de projeto com duração a partir de 3 horas, o tamanho do reservatório de lote necessário

para recuperar a vazão de pico natural não aumenta com o prolongamento da duração da chuva, de modo a potencializar o sucesso da adoção dessa configuração para uma ampla gama de chuvas reais. Para finalizar as possibilidades estudadas de combinação entre telhados verdes e reservatórios de lote, verificou-se o resultado da adoção do reservatório de lote proposto pela legislação municipal aliado ao telhado verde intensivo em 50% da edificação. Essa configuração resultou em extravasamento do reservatório antes do pico da chuva para todas as chuvas de projeto, de modo que a redução de pico de vazão efluente do lote foi de 15%, valor apenas da retenção de água pelo telhado verde, equivalente a 15%.

Os jardins rebaixados simulados de forma isolada no lote com vistas a recuperar a vazão de pico natural precisariam de alturas de rebaixo entre 0,12 e 0,26 m para toda a área a ser mantida permeável (30% do terreno), o que requereria alguns cuidados para evitar riscos aos ocupantes, em função do desnível no solo. Esse aspecto pode ser amenizado com a adoção de um simples talude, para suavizar a



**Figura 1** - Esquema representativo da combinação de jardim rebaixado e reservatório de lote em série dentro do lote.

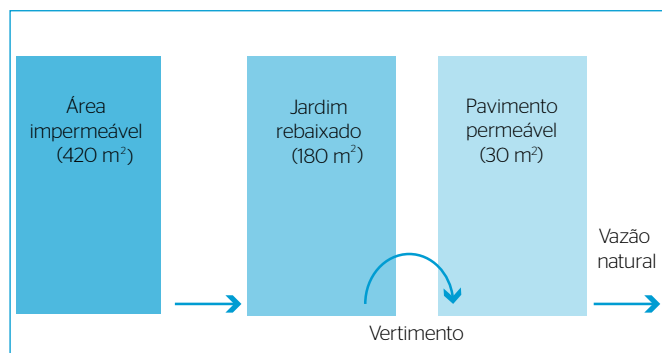


**Figura 2** - Esquema representativo da combinação de jardim rebaixado e reservatório de lote em paralelo dentro do lote.

variação brusca de nível. Caso fosse adotado um jardim rebaixado em 0,10 m na área permeável do lote, seria reduzida a vazão efluente do terreno (76% com relação à vazão de pico da ocupação convencional) apenas para a chuva de projeto de 1 hora e TR = 10 anos, a menor das chuvas de projeto.

Os telhados verdes contribuiriam com a redução do volume total e da vazão de pico efluente do lote, por causa da retenção de parte da precipitação incidente sobre o telhado. No caso dos cenários analisados, a redução da vazão de pico variou entre 4 e 15%, sendo o primeiro valor equivalente a um telhado verde extensivo que ocuparia 20% da área edificável do lote (60 m<sup>2</sup>), e o segundo valor a um telhado verde intensivo em 50% da área edificável do lote (150 m<sup>2</sup>). Logo, os telhados verdes poderiam ser adotados de modo complementar com técnicas de reservação, potencialmente reduzindo os volumes de armazenamento necessários.

Os pavimentos permeáveis mostraram-se uma boa opção para regular a vazão superficial efluente em virtude da precipitação sobre sua própria área. Para tanto, considerando as chuvas de projeto estudadas, seria preciso altura de leito granular composto por brita de, no máximo, 0,13 m. Pela limitação de altura do leito granular de brita em 0,65 m para as características de solo adotadas, a estrutura teria capacidade reduzida de recepção e manejo de escoamentos adjacentes. Para que o pavimento permeável da calçada recebesse o escoamento superficial do lote adjacente e liberasse apenas a vazão natural, a altura de leito granular necessária seria de 1,06 a 1,34 m, variando de acordo com a chuva de projeto. Se o lote em questão tivesse um jardim rebaixado em 0,1 m, configuração apresentada na Figura 3, ainda assim a altura do leito granular teria de ser de 0,15 a 1,27 m. Para as chuvas mais longas (com maiores volumes), porém, esse valor seria superior aos 0,65 m passíveis de serem implementados sem prejuízos estruturais. No entanto, para as chuvas de 1 hora de duração (TR de 10 e 25 anos) e para chuvas de 3 horas de duração e TR de 10 anos, o leito granular de 0,65 m seria capaz de manejar o escoamento superficial do lote adjacente, liberando apenas a vazão natural.



**Figura 3** - Esquema representativo da combinação de jardim rebaixado (dentro do lote) e de pavimento permeável (calçada).

## DISCUSSÃO

Os resultados das simulações deixaram claros os benefícios da adoção das técnicas compensatórias em escala de lote no sentido de recuperar a capacidade de armazenamento e infiltração naturais do terreno, minimizando, assim, os impactos da urbanização no ciclo hidrológico. Cada uma das técnicas estudadas apresentou vantagens e desvantagens em diferentes configurações de aplicação, de modo que é necessário avaliar caso a caso quando da elaboração do projeto de implantação. Faz-se importante ressaltar que os parâmetros adotados nas simulações são empíricos, oriundos da literatura corrente disponível, de maneira que é desejável que sejam validados em campo para as condições locais.

Os reservatórios de lote mostraram-se, em algumas configurações, uma boa opção a ser implantada. Se adotado individualmente com o objetivo de recuperar a vazão natural do lote, este seria muito grande, podendo tornar-se inviável na prática. No outro extremo, o depósito proposto pela legislação municipal apresentou-se totalmente ineficiente para as chuvas de projeto adotadas neste estudo quando adotado isoladamente no lote. Essa configuração de reservatório teria apenas alguma função educacional, no sentido de conscientizar a população de sua responsabilidade pela sustentabilidade da drenagem urbana. A otimização do orifício de fundo do tanque, visando evitar o extravasamento para a chuva de projeto, pode torná-lo mais eficiente, em termos de redução de vazão efluente do lote, com o mesmo volume. Essa adequação, com o aumento do orifício e, por conseguinte, da vazão de saída, é especialmente válida quando houver limite de volume para o reservatório e não for necessária a recuperação da vazão natural do terreno.

A diferença de volumes armazenados entre os reservatórios de lote e jardins rebaixados propostos isoladamente para que saísse apenas a vazão natural do lote deixa clara a importância do orifício de fundo do reservatório, o qual libera durante toda a chuva parte da água do reservatório, reduzindo a necessidade de armazenamento de água. A saída apenas por infiltração do jardim rebaixado reduz a quase zero a vazão efluente do lote, o que aumenta significativamente o volume a ser armazenado para que não haja extravasamento. No entanto, por se tratar de uma técnica de implantação muito simples, ela não deve ser descartada nos estudos de concepção. Nesse sentido, a adoção em paralelo do reservatório de lote proposto pela legislação municipal do Rio de Janeiro, que se mostrou ineficiente se feita isoladamente, seria capaz, com a introdução de um jardim rebaixado em apenas 0,07 m, de regular a vazão efluente do lote aos níveis de pré-urbanização, além de atender à própria legislação municipal.

Os pavimentos permeáveis mostraram-se uma ótima opção para anular o efeito da ocupação de sua própria área. Contudo,

para amenizar o impacto de áreas adjacentes, ele é limitado, por conta da máxima altura do leito granular possível de ser adotada para que o pavimento não perca suporte estrutural. É relevante salientar que, neste caso de estudo, a área de calçada era muito menor que a do lote, o que dificulta (ou impede, na prática) tecnicamente a contribuição de a calçada colaborar na amenização dos impactos hidrológicos causados pelo lote.

Todavia, a proporção utilizada na pesquisa entre área de calçada e de lote adjacente atende à legislação municipal, correspondendo, portanto, com aquilo que possivelmente se verifica na prática. Com fins de combinar estruturas nas áreas públicas e privadas, no cenário em que o pavimento receberia a vazão efluente do lote, resultante do extravasamento de um jardim rebaixado em 0,10 m, as menores chuvas poderiam ser absorvidas, recuperando a vazão natural de toda a área drenada. Vale ressaltar que os rebaixos de jardim poderiam ser maiores do que os 0,10 m considerados como satisfatórios neste trabalho, já que 0,17 m é a medida usual para um degrau comum, desnível facilmente aceito, e ainda há a possibilidade de fazer taludes para amenizar os desníveis bruscos no solo.

Em alguns cenários estudados, ficaram claras a maior eficiência e viabilidade de adoção das estruturas para as chuvas de menores volumes precipitados (menores durações), para as quais os investimentos do proprietário não seriam muito elevados e a problemática da microdrenagem seria amenizada. Além dos benefícios hidráulicos da adoção das técnicas compensatórias nos lotes, sua regulamentação e implementação têm função educacional importante: a conscientização e o acionamento da população com relação à responsabilidade pelos impactos hidrológicos resultantes da ocupação do solo. Para as chuvas mais longas (de maior volume) é proposta a atuação conjunta dos poderes público e privado, de modo a não onerar demasiadamente o proprietário do lote e, ao mesmo tempo, controlar os impactos hidrológicos do crescimento urbano. Nessa perspectiva, em adição ao tema especificamente tratado neste artigo, áreas públicas, como parques e praças, poderiam ser utilizadas como paisagens multifuncionais.

A ampla variedade de estruturas e configurações analisadas por meio da modelagem possibilita o balizamento de parâmetros e a orientação de combinações possíveis para maior assertividade e simplicidade na elaboração de projetos reais. As chuvas de projeto estudadas, que variaram em sua duração (1, 3, 6 e 12 horas) e intensidade (TR de 10 e 25 anos), também disponibilizam dados para a extrapolação dos resultados deste trabalho

para bacias hidrográficas de diferentes escalas. Assim, é possível orientar, para um caso real, as melhores técnicas e dimensões a serem adotadas para um terreno com determinadas características e situado em uma dada bacia hidrográfica. Essas informações também podem ser úteis para fundamentar a proposição de políticas públicas de drenagem urbana sustentável, conforme previsto nos objetivos deste artigo.

## CONCLUSÕES

A avaliação das diferentes combinações de técnicas compensatórias na escala de lote apontou para a possibilidade de redução dos impactos hidrológicos resultantes da ocupação com a adoção de estruturas simples e em combinações entre elas, para a configuração do lote estudado. Uma combinação que se mostrou muito eficiente hidrológicamente e exequível para o proprietário foi a adoção do reservatório de lote proposto pela legislação municipal, de dimensões moderadas, aliada paralelamente a um jardim rebaixado em apenas 0,07 m na área livre, não construída, do lote. Essa combinação seria capaz de reduzir a vazão efluente do lote a valores inferiores aos de pré-urbanização para todas as chuvas de projeto avaliadas, contribuindo, portanto, com a manutenção das condições de funcionamento das redes de micro e macrodrenagem já implantadas na bacia.

De modo geral, as estruturas e combinações avaliadas mostraram-se eficientes, especialmente para as chuvas de projeto de menores volumes precipitados (menores durações). Para as chuvas mais longas (e de maiores volumes), propõe-se a atuação conjunta dos poderes público e privado, de modo a não onerar demasiadamente o proprietário e, ao mesmo tempo, controlar os impactos hidrológicos resultantes da urbanização. Nesse contexto, a utilização do sistema de áreas livres da cidade como alternativa para a armazenagem temporária das cheias, configurando paisagens multifuncionais, poderia ser uma alternativa complementar de ação do poder público.

A ampla gama de resultados dos variados cenários possibilita a sua utilização para o balizamento de parâmetros e configurações para projetos reais e políticas públicas para drenagem urbana sustentável. Esse atributo é reforçado pela variedade de chuvas de projeto avaliadas, que contemplam as escalas de micro e macrodrenagem e permitem inferir comportamentos para lotes em bacias de diferentes tamanhos, em função dos diversos tempos de duração simulados.

## REFERÊNCIAS

- AHIABLAME, L. M.; ENGEL, B. A.; CHAUBEY, I. (2012). Effectiveness of low impact development practices: literature review and suggestions for future research. *Water, Air, Soil & Pollution*, v. 223, n. 7, p. 4.253-4.273.
- BAPTISTA, M.; NASCIMENTO, N.; BARRAUD, S. (2005). *Técnicas compensatórias em drenagem urbana*. 2. ed. 2011. Porto Alegre: ABRH. 318 p.
- BRASIL. Ministério das Cidades. (2012). *Manual para apresentação de propostas para sistemas de drenagem urbana sustentável e de manejo de águas pluviais*. Programa 2040: gestão de riscos e respostas a desastres. Disponível em: <[http://www.cidades.gov.br/images/stories/ArquivosSNSA/Arquivos\\_PDF/Manual\\_de\\_Drenagem\\_2012.pdf](http://www.cidades.gov.br/images/stories/ArquivosSNSA/Arquivos_PDF/Manual_de_Drenagem_2012.pdf)>. Acesso em: 12 mar. 2014.
- CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. (1994). *Hidrología aplicada*. Santa Fé de Bogotá (Colômbia): McGraw-Hill. 584 p.
- DOUBLEDAY, G.; SEBASTIAN, A.; LUTTENSCHLAGER, T.; BEDIANT, P. (2013). Modeling hydrologic benefits of low impact development: a distributed hydrologic model of The Woodlands, Texas. *Journal of The American Water Resources Association*, v. 49, n. 6, p. 1.444-1.455.
- ELGA, S.; JAN, B.; OKKE, B. (2015). Hydrological modeling of urbanized catchments: a review and future directions. *Journal of Hydrology*, v. 529, p. 62-81.
- FORSCHUNGSGESELLSCHAFT LANDSCHAFTSENTWICKLUNG LANDSCHAFTSBAU - FLL. (2002). *Guideline for the planning, execution and upkeep of green-roof sites: roof-greening guideline*. Bonn (Alemanha): Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau. 95 p.
- MARCHIONI, M.; BECCIU, G. (2014). Permeable pavement used on sustainable drainage systems (SUDs): a synthetic review of recent literature. *Urban Water II*, v. 139, p. 183-194.
- MARCHIONI, M.; SILVA, C. O. (2011). *Pavimento intertravado permeável: melhores práticas*. São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP). 24 p.
- OLIVEIRA, E. W. N. (2009). *Telhados verdes para habitações de interesse social: retenção das águas pluviais e conforto térmico*. Dissertação (Mestrado) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 87 p.
- PREFEITURA MUNICIPAL DO RIO DE JANEIRO. (1970). *Decreto "E" n.º 3.800, de 20 de abril de 1970*. Aprova os Regulamentos complementares à Lei do Desenvolvimento Urbano do Estado da Guanabara e dá outras providências. Rio de Janeiro.
- PREFEITURA MUNICIPAL DO RIO DE JANEIRO. (1976). *Decreto n.º 332, de 3 de março de 1976*. Aprova o Regulamento de Zoneamento do Município do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro.
- PREFEITURA MUNICIPAL DO RIO DE JANEIRO. (1985). *Decreto n.º 5.280, de 23 de agosto de 1985*. Cria a XXV e a XXVI Região Administrativa (Pavuna e Guaratiba), modifica a denominação e a delimitação das Regiões Administrativas constantes do Decreto n.º 3.157, de 23/7/81, altera a codificação e a delimitação dos bairros constantes do Decreto n.º 3.158, de 23/7/81, o Regulamento de Parcelamento da Terra aprovado pelo Decreto "E" n.º 3.800, de 20/4/70, e o Regulamento de Zoneamento aprovado pelo Decreto n.º 322, de 3/3/76, e dá outras providências. Rio de Janeiro.
- PREFEITURA MUNICIPAL DO RIO DE JANEIRO. (2004). Lei Municipal n.º 23.940, de 30 de janeiro de 2004. Torna obrigatório, nos casos previstos, a adoção de reservatórios que permitam o retardo do escoamento das águas pluviais para a rede de drenagem. *Diário Oficial do Rio de Janeiro*. Rio de Janeiro.
- PREFEITURA MUNICIPAL DO RIO DE JANEIRO. (2005). *Resolução Conjunta SMG/SMO/SMU n.º 001, de 27 de janeiro de 2005*. Disciplina os procedimentos a serem observados no âmbito dessas secretarias para o cumprimento do Decreto n.º 23.940, de 30 de janeiro de 2004. Rio de Janeiro.
- PREFEITURA MUNICIPAL DO RIO DE JANEIRO. (2009). *Lei Complementar n.º 104, de 27 de novembro de 2009*. Institui o Projeto de Estruturação Urbana (PEU) dos bairros de Vargem Grande, Vargem Pequena, Camorim e parte dos bairros do Recreio dos Bandeirantes, Barra da Tijuca e Jacarepaguá, nas XXIV e XVI Regiões Administrativas, integrantes das Unidades Espaciais de Planejamento números 46, 47, 40 e 45 e dá outras providências. Rio de Janeiro.
- ROY, A. H.; WENGER, S. J.; FLETCHER, T. D.; WALSH, C. J.; LADSON, A. R.; SHUSTER, W. D.; THURSTON, H. W.; BROWN, R. R. (2008). Impediments and solutions to sustainable, watershed-scale urban stormwater management: lessons from Australia and the United States. *Environmental Management*, n. 42, n. 2, p. 344-359.
- TOMAZ, P. (2010). Trincheira de infiltração. In: TOMAZ, P. *Curso de manejo de águas pluviais*. Disponível em: <[http://www.pliniotomaz.com.br/downloads/Novos\\_livros/livro\\_poluicao\\_difusa/capitulo14.pdf](http://www.pliniotomaz.com.br/downloads/Novos_livros/livro_poluicao_difusa/capitulo14.pdf)>. Acessado em: 16 out. 2013.
- TOMAZ, P. (2013). Método racional. In: TOMAZ, P. *Curso de manejo de águas pluviais*. Disponível em: <[http://www.pliniotomaz.com.br/downloads/Novos\\_livros/livro\\_metodo\\_calculos\\_vazao/capitulo02.pdf](http://www.pliniotomaz.com.br/downloads/Novos_livros/livro_metodo_calculos_vazao/capitulo02.pdf)>. Acesso em: 21 out. 2015.
- VARGAS, M. C. (1999). O gerenciamento integrado dos recursos hídricos como problema socioambiental. *Ambiente & Sociedade*, n. 5, p. 109-134.