

# LOCALIZAÇÃO OTIMIZADA DE BACIAS DE DETENÇÃO EM SISTEMA DE DRENAGEM DE ÁGUAS PLUVIAIS

MARIA C. CUNHA <sup>1</sup>; JOÃO A. ZEFERINO <sup>2</sup>; NUNO E. SIMÕES <sup>3</sup>; e JUAN G. SALDARRIAGA <sup>4</sup>

1. Professora Catedrática – MARE, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra - Polo II, 3030-788 Coimbra, Portugal. Email: mccunha@dec.uc.pt
2. Professor Auxiliar Convidado – MARE, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra - Rua Luís Reis Santos - Polo II, 3030-788 Coimbra, Portugal. Email: zeferino@dec.uc.pt
3. Professor Auxiliar – MARE, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Coimbra - Rua Luís Reis Santos - Polo II, 3030-788 Coimbra, Portugal. Email: nunocs@dec.uc.pt
4. Professor Titular, Centro de Investigaciones en Acueductos y Alcantarillados (CIACUA), Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia. Email: jsaldarr@uniandes.edu.co

## Resumo

As inundações urbanas afetam as populações e podem originar grandes impactes, dando origem a elevados prejuízos. O aumento da urbanização e as alterações climáticas são dois dos principais fatores que contribuem para estas ocorrências. A capacidade dos sistemas de drenagem instalados para drenar todo o escoamento originado em consequência de eventos de precipitação extrema deve, por isso, ser revista. As soluções a implementar requerem novas abordagens, tais como as habitualmente referidas por “sistemas urbanos de drenagem sustentável (SUDS)”, onde se incluem as bacias de detenção. Dada a importância, a complexidade e os elevados custos envolvidos na instalação de tais infraestruturas, é necessário decidir entre várias alternativas possíveis para a sua localização e para o seu dimensionamento. Um sistema de drenagem eficiente deve ser capaz de receber todo o escoamento de um evento de precipitação sem que ocorram inundações ou, pelo menos, sem que a população seja afetada negativamente. Neste artigo apresenta-se um modelo de otimização para a localização e dimensionamento de bacias de detenção em redes de drenagem existentes onde ocorrem inundações frequentes. A solução a executar será aquela que corresponda ao menor custo, evitando simultaneamente os impactes devidos às inundações, e garantindo o cumprimento das leis hidráulicas e dos requisitos regulamentares. De forma a representar convenientemente as decisões a tomar, o modelo de otimização incorpora variáveis discretas e funções não-lineares, sendo portanto necessário recorrer a métodos heurísticos para a sua resolução. Em particular, é usado um algoritmo de recozimento simulado (*simulated annealing*) que tem apresentado resultados notáveis quando aplicado em diversos problemas de planeamento de infraestruturas hidráulicas. Para implementar o modelo foi desenvolvida uma aplicação computacional, *OptSU*. Esta inclui o algoritmo de recozimento simulado, que acede a um simulador hidráulico sempre que necessário. A aplicação é testada num estudo de caso inspirado num sistema de drenagem de águas pluviais real de uma zona urbana localizada em Portugal.

**Palavras-chave:** Drenagem, otimização, cheias urbanas, bacias de detenção

## 1. INTRODUÇÃO

As inundações urbanas afetam as populações e podem originar grandes impactos, dando origem a elevados prejuízos. O aumento da urbanização e as alterações climáticas são dois dos principais fatores que contribuem para estas ocorrências (Butler e Davies, 2011). A capacidade dos sistemas de drenagem instalados para drenar todo o escoamento originado em consequência de eventos de precipitação extrema deve, por isso, ser revista.

As soluções a implementar nos problemas de inundações requerem novas abordagens, tais como as habitualmente referidas por “sistemas urbanos de drenagem sustentável (SUDS)” (Fletcher *et al.*, 2014). No caso de sistemas já existentes, uma das soluções mais eficazes é a construção de estruturas de armazenamento temporário, bacias de retenção (*storage unit* – SU). Dada a importância, a complexidade e os elevados custos envolvidos na instalação de tais infraestruturas, é necessário decidir entre várias alternativas possíveis para a sua localização e para o seu dimensionamento. Um sistema de drenagem de águas pluviais eficiente deve ser capaz de receber todo o escoamento de um evento de precipitação sem que ocorram inundações ou, pelo menos, sem que a população seja afetada negativamente. A solução a implementar será aquela que corresponda ao menor custo, evitando simultaneamente os impactos devidos às inundações, e garantindo o cumprimento das leis hidráulicas e dos requisitos regulamentares. Nesse sentido, surge a necessidade de implementar modelos de otimização que permitam encontrar a localização e dimensões ótimas para a instalação de SU em redes existentes de drenagem urbanas onde ocorrem inundações frequentes. Modelos de otimização para a localização de infraestruturas de armazenamento a uma escala regional têm sido recentemente aplicados fazendo uso de heurísticas modernas, incorporando modelos comerciais de simulação de bacias hidrográficas (Yazdi e Neyshabouri, 2012; Artita *et al.*, 2013).

Neste artigo apresenta-se um modelo de decisão para a localização e dimensionamento de SU em redes existentes de drenagem de águas pluviais em meios urbanos. Para implementar o modelo foi desenvolvida uma aplicação computacional, *OptSU*, que inclui o método de resolução baseado numa heurística moderna, que acede a um simulador hidráulico sempre que necessário. O *OptSU* é testado num estudo de caso inspirado num sistema de drenagem real de uma zona urbana localizada em Portugal.

## 2. MODELO DE DECISÃO

De forma a se dispor de uma ferramenta de apoio à decisão foi desenvolvida em Visual Basic uma aplicação computacional de uso fácil, *OptSU*, capaz de operar em qualquer computador com o sistema operativo Windows. *OptSU* incorpora um modelo de otimização para a localização e dimensionamento de SU em redes de drenagem onde ocorrem inundações frequentes. As SU consideradas são estruturas em betão, com paredes verticais, e com um orifício para controlar o caudal que escoar para jusante.

Na ausência de estimativas precisas de custos para as SU e para os danos provocados por inundações, o modelo de decisão é construído para gerir de forma ótima os volumes originados por eventos extremos de precipitação (inundações e volumes de armazenamento nas SU). Em conjunto, o modelo contém restrições de inundações e de capacidade que especificam os limites de inundações e dimensões das SU que devem ser verificados. O comportamento da rede de drenagem deve também estar de acordo com as leis físicas da hidrologia e hidráulica. Nesse sentido, a variação das alturas de água e caudais na rede de

drenagem devido a cada evento de precipitação são determinados recorrendo ao programa de simulação hidrológico-hidráulica EPA-SWMM (Rossman, 2010). De forma a representar convenientemente as decisões a tomar, o modelo de otimização incorpora variáveis discretas e funções não-lineares, sendo portanto necessário recorrer a um método heurístico para a sua resolução.

## 2.1. Formulação do Modelo

Seguidamente apresenta-se o modelo de otimização. A Figura 1 apresenta esquematicamente a implementação de uma SU na rede, indicando as principais variáveis relacionadas que são usadas no modelo.

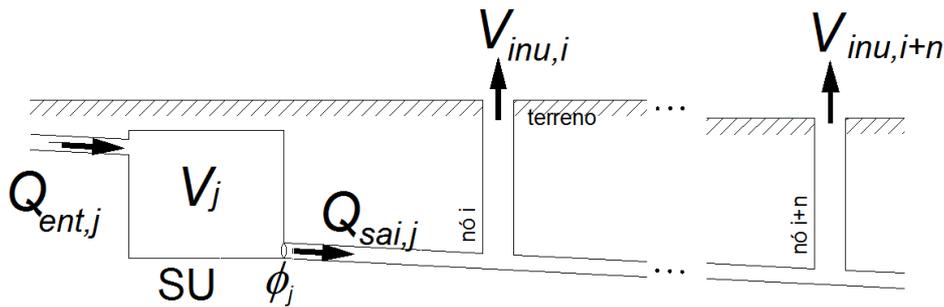


Figura 1. Representação esquemática da implementação de uma SU na rede

A formulação do modelo é a seguinte:

$$\text{Min} \sum_{j \in N_U} V_j + \sum_{i \in N} \theta_i \cdot V_{inu,i} \quad (1)$$

sujeito a:

$$V_j = f(Q_{ent,j}, Q_{sai,j}) \quad , \quad j \in N_U \quad (2)$$

$$\sum_{i \in N} V_{inu,i}(\phi_j, Q_{sai,j}) \leq V_{inu,max} \quad , \quad j \in N_U \quad (3)$$

$$\sum_{j \in N_U} y_j \leq NSU \quad (4)$$

$$V_j \geq V_{min,j} \cdot y_j \quad , \quad j \in N_U \quad (5)$$

$$V_j \leq V_{max,j} \cdot y_j \quad , \quad j \in N_U \quad (6)$$

$$\phi_j \geq \phi_{min,j} \cdot y_j \quad , \quad j \in N_U \quad (7)$$

$$\phi_j \leq \phi_{max,j} \cdot y_j \quad , \quad j \in N_U \quad (8)$$

$$Q_{out} \leq Q_{out,max} \quad , \quad j \in N_U \quad (9)$$

$$y_j \in \{0,1\} \quad , \quad j \in N_U \quad (10)$$

$$V_{inu,i} \geq 0 \quad , \quad i \in N \quad (11)$$

em que

$N_U$  - conjunto de possíveis SU;

$N$  - conjunto de todos os nós;

$V_j$  - volume da SU no nó  $j$ ;

$\theta_i$  - coeficiente que expressa a importância atribuída aos impactes de inundações no nó  $i$ ;

$V_{inu,i}$  - volume de inundação que ocorre no nó  $i$ ;

$Q_{ent,j}$  e  $Q_{sai,j}$  - caudais de entrada e saída da SU no nó  $j$ , respetivamente;

$\phi_j$  - diâmetro do orifício à saída da SU no nó  $j$ ;

$y_j$  - variável binária que toma o valor 1 ou 0 consoante se construa ou não uma SU no nó  $j$ ;

$V_{inu,max}$  - volume máximo de inundação que pode ocorrer na rede;

$NSU$  - número máximo de SU que podem ser implementadas na rede;

$Q_{out}$  - caudal na saída da rede;

$Q_{max,out}$  - caudal máximo permitido na saída da rede;

$V_{min,j}$  e  $V_{max,j}$  - volumes mínimos e máximos caso exista uma SU no nó  $j$ , respetivamente;

$\phi_{min,j}$  e  $\phi_{max,j}$  - diâmetros mínimos e máximos do orifício à saída da SU no nó  $j$ , respetivamente;

O primeiro termo da função objetivo (1) consiste na soma dos volumes de todas as SU que são implementadas na rede de drenagem. O segundo termo representa os volumes totais de inundações, obtidos através da soma ponderada dos volumes de inundações ocorridos em todos os nós da rede de drenagem. O coeficiente  $\theta_i$  permite ao decisor ajustar a importância atribuída aos impactes das inundações em cada nó  $i$ . Desta forma podem ser analisados os compromissos entre os dois termos.

A restrição (2) define o volume necessário para a SU no nó  $j$ , resultante da conservação da massa entre o caudal de entrada na SU e do caudal de saída que permite reduzir as inundações a jusante. A restrição (3) especifica o limite máximo para os caudais de inundação que deve ser verificado. A inundação de um nó  $i$  a jusante de uma SU em um nó  $j$  é dependente dos caudais de saída dessa SU, sendo este limitado pelo respetivo diâmetro de saída. A restrição (4) limita o número de SU a um máximo de  $NSU$ . As restrições (5) e (6) asseguram, respetivamente, que o volume de uma SU localizada no nó  $j$  seja maior do que o tamanho mínimo pré-definido (essa restrição é utilizada como um *proxy* para representar o efeito dos custos fixos de construção e economias de escala quando a SU é implementada) e inferior à sua capacidade máxima pré-definida (de acordo com o espaço disponível no local). As restrições (7) e (8) garantem, respetivamente, que o diâmetro do orifício à saída de uma SU no nó  $j$  é maior do que o seu valor mínimo pré-definido (diâmetros muito pequenos são suscetíveis de ser obstruídos) e menor do que o valor máximo pré-definido (isto é, o diâmetro da conduta a jusante). A restrição (9) limita o caudal na saída da rede. As restrições (10) e (11) especificam o domínio de algumas variáveis.

## 2.2. Método de resolução

Para resolver o modelo, *OptSU* contém um método de resolução baseado num algoritmo de recozimento simulado (*simulated annealing* – SA), que acede a um simulador hidráulico sempre que necessário.

As heurísticas modernas são muitas vezes inspiradas em analogias naturais e físicas, aplicando estratégias de procura que evitam soluções ótimas locais, tendo-se tornado muito populares nas últimas décadas (Rothlauf, 2011). Em particular, o algoritmo SA, introduzido pela primeira vez em Kirkpatrick *et al.* (1983), pode ser concebido para incorporar modelos que simulem o comportamento de sistemas complexos. Este algoritmo tem vindo a ser usada com resultados notáveis em vários outros modelos de planeamento de sistemas hidráulicos (Cunha e Sousa, 1999; Zeferino *et al.*, 2009).

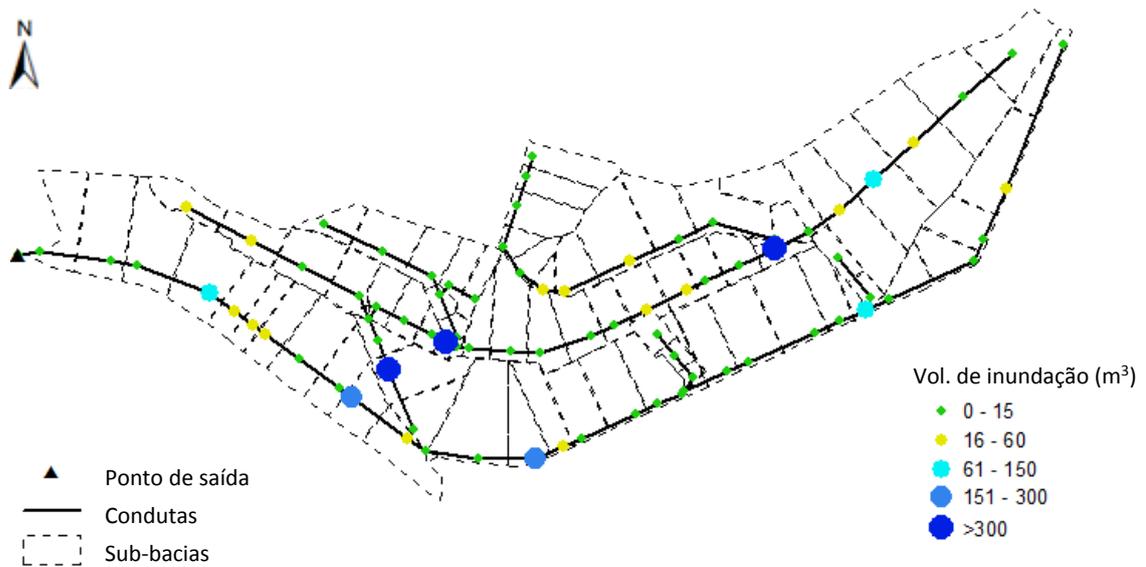
Uma corrida típica do SA consiste num número de sucessivas alterações (aleatórias) na vizinhança de uma solução em análise, dentro do espaço de soluções do problema. O curso do SA é controlado por um conjunto de parâmetros, entre os quais um dos mais importantes é a temperatura. Inicialmente, quando a temperatura é elevada, uma grande variedade de soluções candidatas pode ser aceite. Enquanto a temperatura for diminuindo durante o processo, de acordo com um esquema de arrefecimento, a probabilidade de aceitar soluções que de má qualidade vai reduzindo. Desta forma, começando com uma solução inicial, o SA procura progressivamente novas soluções candidatas até que seja encontrada uma solução perto da ótima (tal como uma solução de custo mínimo em problemas de minimização de custos).

Em cada solução avaliada durante o SA, uma simulação do comportamento hidráulico da rede é realizada fazendo uso do SWMM, ligado através de um *Toolkit* (Iglesias e Martinez, 2014). O programa *OptSU* acede aos dados da rede, modificando-os de acordo com o algoritmo SA, como por exemplo na geração de novas soluções candidatas.

## 3. ESTUDO DE CASO

O modelo de decisão proposto foi testado num estudo de caso inspirado num sistema de drenagem real de uma zona urbana localizada em Portugal. O estudo de caso é utilizado para demonstrar e avaliar o comportamento do modelo. A região tem uma área total de 16,6 ha contendo um total de 81 condutas. Com base nas curvas IDF portuguesas, foi considerada uma chuvada de projeto com um período de retorno de 100 anos, que simula um evento extremo de precipitação.

Para a chuvada considerada, a situação de referência, ou seja, a situação atual sem SU implementadas, tem um volume total de inundação de 2379 m<sup>3</sup>, possuindo 3 nós onde as inundações são superiores a 300 m<sup>3</sup>, atingindo um máximo local de cerca de 450 m<sup>3</sup>. A região do estudo de caso e a localização dos volumes de inundação em cada nó são apresentados na Figura 2.



**Figura 2. Volumes de inundação na situação de referência**

Teoricamente, em cada nó da rede poderia ser colocada uma SU e o modelo de otimização iria fornecer uma solução com base nos objetivos específicos do problema. No entanto, o resultado seria um problema computacionalmente muito complexo e exigente. Fazendo uma pré-avaliação da área em estudo e da situação de referência, o número de potenciais locais para a colocação de SU pode ser reduzido. Esta avaliação deve considerar o espaço disponível, a viabilidade para a implementação das SU, e seu impacto esperado na redução de inundações.

Depois de analisada a morfologia da região e a situação de referência em termos de inundações, foram definidos seis possíveis locais para a implementação de SU (Figura 3). Esses locais correspondem aos pontos críticos (viáveis) que envolvem a ocorrência de inundações (no próprio nó ou a jusante do mesmo). Para este estudo de caso, considerou-se que o volume mínimo e máximo de cada SU é de 100 m<sup>3</sup> e 2000 m<sup>3</sup>, respectivamente. O orifício à saída de uma SU pode ter um diâmetro mínimo de 25% do diâmetro máximo, que é o diâmetro correspondente da secção transversal da conduta a jusante.

Foram considerados quatro exemplos diferentes. Estes envolvem a atribuição de diferentes importâncias (peso) aos volumes de armazenamento ou aos volumes de inundação, e a variação dos parâmetros relativos às diferentes restrições. Por exemplo, o peso da inundação pode variar de 0 (não importante) a 10 (muito importante), ou o volume de inundação na região pode ser limitado a um máximo de 1000 m<sup>3</sup>, assumindo-se que esse valor não criaria impactos negativos. O número de SU a implementar também pode ser limitado. Consequentemente, os quatro exemplos são elaborados de forma a mimetizar problemas reais, permitindo avaliar o desempenho do modelo proposto.

- Exemplo A: peso da inundação  $\theta_i = 2$  em todos os nós; sem limite ao volume de inundação; número de SU ilimitado.
- Exemplo B: peso da inundação  $\theta_i = 10$  nos nós a jusante da SU6 e  $\theta_i = 0$  para os nós a montante; sem limite ao volume de inundação; número de SU ilimitado.

- Exemplo C: peso da inundação  $\theta_i = 0$  em todos os nós; limite das inundações totais = 1000 m<sup>3</sup>; número de SU ilimitado.
- Exemplo D: peso da inundação  $\theta_i = 10$  em todos os nós; sem limite ao volume de inundação; número máximo de SU ( $NSU = 2$ ).

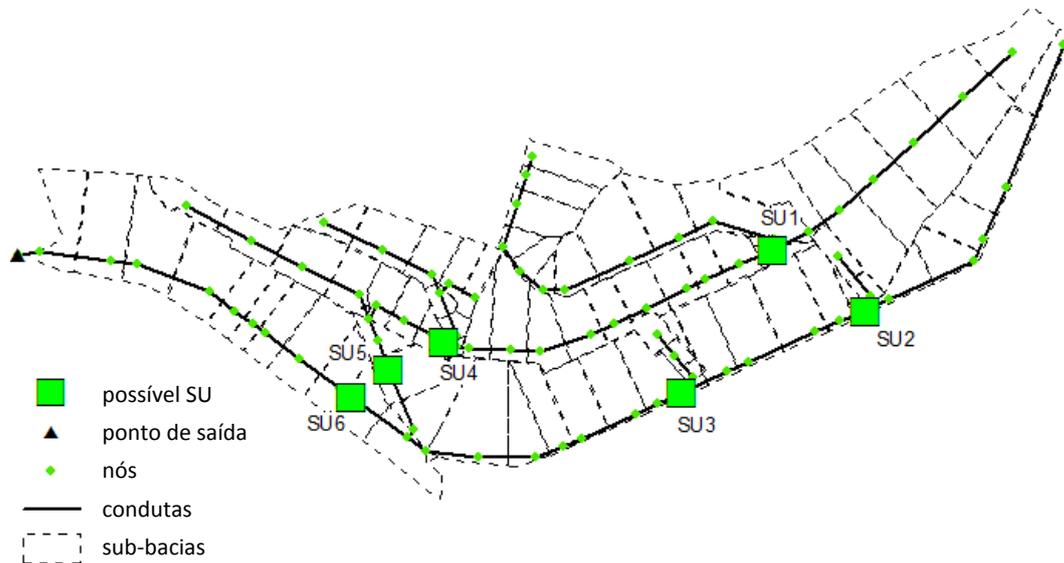


Figura 3. Localização possível para as SU

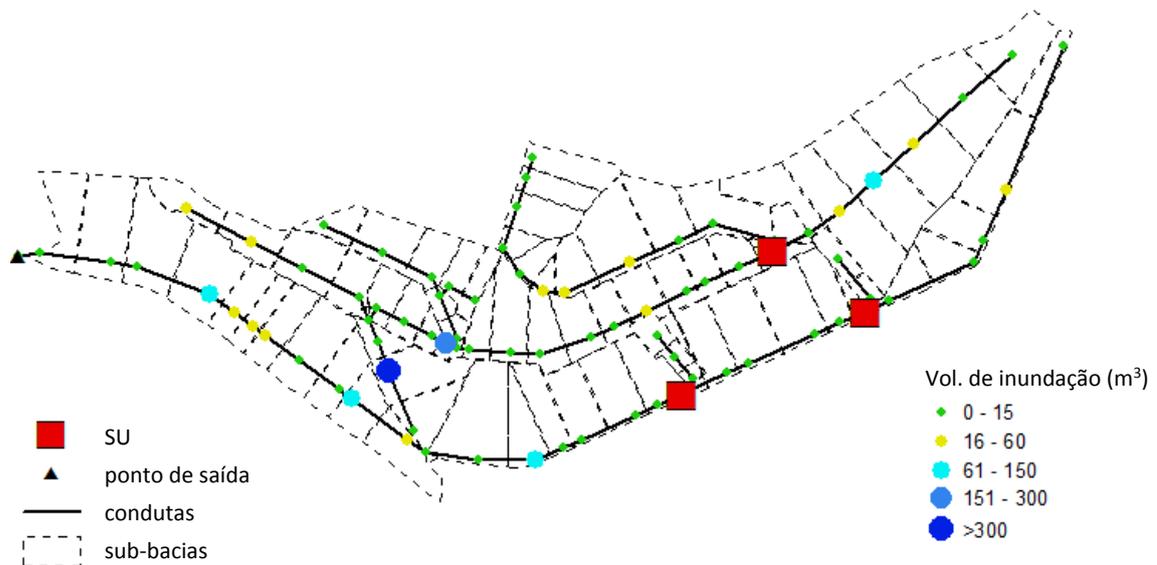
### 3.1. Resultados

Foram testados os diferentes exemplos, com os resultados descritos em seguida. A Tabela 1 resume os resultados em termos de SU, volume de armazenamento, dimensões do orifício e volume de inundação.

Tabela 1. Resultados para os quatro exemplos

		SU <sub>1</sub>	SU <sub>2</sub>	SU <sub>3</sub>	SU <sub>4</sub>	SU <sub>5</sub>	SU <sub>6</sub>	ΣSU	Vol. Inund. (m <sup>3</sup> )
Situação referência	Vol SU. (m <sup>3</sup> )	-	-	-	-	-	-	0	2416
	Diam. Orif (m)	-	-	-	-	-	-	-	
Exemplo A	Vol SU. (m <sup>3</sup> )	1084	126	212	-	-	-	1422	1526
	Diam. Orif (m)	0.394	0.316	0.376	-	-	-	-	
Exemplo B	Vol SU. (m <sup>3</sup> )	1422	134	-	546	600	916	3618	749
	Diam. Orif (m)	0.330	0.322	-	0.462	0.498	0.634	-	
Exemplo C	Vol SU. (m <sup>3</sup> )	1408	-	362	632	-	-	2402	1000
	Diam. Orif (m)	0.332	-	0.335	0.446	-	-	-	
Exemplo D	Vol SU. (m <sup>3</sup> )	2000	-	-	-	1346	-	3346	1014
	Diam. Orif (m)	0.252	-	-	-	0.369	-	-	

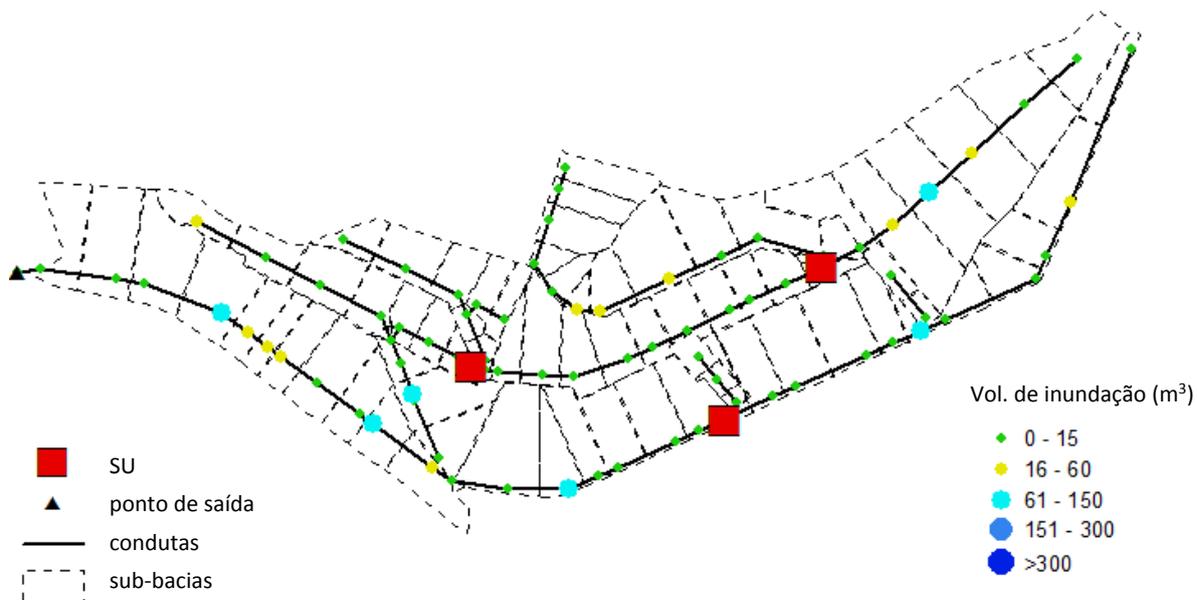
No Exemplo A (Figura 4), o peso das inundações é baixo e não há restrições relativas ao limite de inundações nem de número de SU a implementar. Conseqüentemente os resultados obtidos para volume de inundação correspondem à menor redução entre os quatro exemplos, de apenas cerca de 40% relativamente à situação de referência. No entanto a capacidade das SU é também a menor, com três SU localizadas em zonas de montante da rede.



**Figure 4. Localização das SU e volumes de inundação para o Exemplo A**

O Exemplo B utiliza um peso elevado em alguns nós de jusante, sendo nulo nos restantes nós. Dado que neste exemplo não há restrição ao número de SU a implementar e alguns nós da rede possuem uma penalização das inundações bastante elevada, a solução prevê a construção de cinco SU, com um grande volume total de armazenamento (o maior entre os diferentes exemplos). Conseqüentemente, o volume total de inundação obtido para este exemplo foi o mais baixo de todos, correspondendo a cerca de 70% de redução relativamente à situação de referência.

No Exemplo C (Figura 5), como seria de esperar, a melhor solução obtida tem um volume de inundação igual ao seu valor máximo permitido de 1000 m<sup>3</sup>, equivalente a uma redução de cerca de 60% relativamente à situação de referência. Isto é obtido com a implementação de apenas três SU. Comparando com o Exemplo A, que também possui três SU, o volume total de armazenamento nas SU é quase 70% mais elevado, mas o volume de inundação é 35% menor.



**Figura 5. Localização das SU e volumes de inundação para o Exemplo C**

No Exemplo D o valor do peso das inundações adotado foi elevado em todos os nós e, conseqüentemente, o volume inundações baixou 60% relativamente à situação de referência. Apesar de apenas duas SU terem sido permitidas, a capacidade total de armazenamento é bastante elevada, uma vez que ambas as SU selecionadas ficam com grandes dimensões (a  $SU_1$  tem a capacidade máxima permitida). Comparativamente ao Exemplo C, apesar da capacidade total de SU ser 40% superior, o volume de inundação é semelhante. Isto sucede devido ao limite de duas SU no Exemplo D, que não permite uma distribuição das SU tão eficiente quanto no Exemplo C.

#### 4. CONCLUSÃO

O presente artigo descreveu um modelo de decisão e respetiva aplicação computacional, *OptSU*, para a localização otimizada de SU em sistema de drenagem de águas pluviais. Na sua resolução foi utilizado um algoritmo SA e o simulador hidráulico SWMM. Foi testado um estudo de caso, baseado numa rede real de drenagem urbana, sendo considerados quatro exemplos com diferentes parâmetros para penalizar os volumes de inundação nos diferentes nós, e limitar o volume total de inundações e o número de SU implementadas.

Como esperado, em todos os exemplos verificou-se uma redução do volume de inundação relativamente à solução de referência, no entanto obtiveram-se diferentes reduções. No Exemplo A, o peso de inundação foi baixo, portanto, apenas uma redução de 40% do volume de inundações foi obtida. Para outros exemplos, com pesos superiores ou limitações do volume de inundação, o volume de inundação diminuiu entre 70% no Exemplo B e 60% nos Exemplos C e D. Os Exemplos C e D têm volumes de inundação semelhantes, mas foi obtido um volume total de armazenamento nas SU inferior no Exemplo C, embora recorrendo a mais SU. O menor volume de inundações, obtido no Exemplo B, deve-se ao seu grande volume de armazenamento.

No futuro, uma formulação alternativa do modelo de otimização pode fazer uso, caso existam, de funções de custos do investimento e operação da infraestrutura, bem como dos danos das inundações. Além disso, os problemas de incerteza relacionados com as alterações climáticas e urbanização poderão ser incluídos na abordagem de otimização de forma a obter soluções robustas que funcionem bem em todos os cenários possíveis.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Mexichem, Colombia por financiar essa investigação através do projeto “Drenaje Urbano y Cambio Climático: hacia los sistemas de alcantarillado del futuro. Fase I”, sem o qual não teria sido possível concluir este estudo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Artita, K.S., Kaini, P., Nicklow, J.W. (2013). Examining the Possibilities: Generating Alternative Watershed-Scale BMP Designs with Evolutionary Algorithms. *Water resources management*, 27(11), 3849-3863.

Butler, D., Davies, J.W. (2011). *Urban Drainage*, 3rd Edition. CRC Press, London.

Cunha, M.C., Sousa, J. (1999). Water distribution network design optimization: simulated annealing approach. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 125(4), 215-221.

Fletcher, T., Shuster, W., Hunt, W., Ashley, R., Butler, D., Arthur, S., Trowsdale, S., Barraud, S., Semadeni-Davies, A., Bertrand-Krajewski, B., Mikkelsen, P., Rivard, G., Uhl, M., Dagenais, D., Viklander, M. (2014). SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. *Urban Water Journal*, 1-18.

Iglesias, P.L., Martínez, F. J. (2014). Guía de Manejo Rápido de la Librería de Conexión de SWMM 5, Universidad Politécnica de Valencia, España.

Kirkpatrick, S., Gellatt, C., Vecchi, M. (1983). Optimization by simulated annealing. *Science*, 220(4598), 671-680.

Rossman, L. (2010). *Storm Water Management Model User's Manual, Version 5.0*. Cincinnati: National Risk Management Research Laboratory, Office of Research and Development, US-EPA.

Rothlauf, F. (2011). *Design of modern heuristics: principles and application*. Springer Science & Business Media, Berlin.

Yazdi, J., Neyshabouri, S.S. (2012). Optimal design of flood-control multi-reservoir system on a watershed scale. *Natural hazards*, 63(2), 629-646.

Zeferino, J.A., Antunes, A.P., Cunha, M.C. (2009). An efficient simulated annealing algorithm for regional wastewater system planning. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 24(5), 359-370.