



ISSN: 2447-3359

REVISTA DE GEOCIÊNCIAS DO NORDESTE

Northeast Geosciences Journal

v. 10, nº 1 (2024)

<https://doi.org/10.21680/2447-3359.2024v10n1ID34911>



Análise da Implantação de Reservatórios de Detenção em Lotes Urbanos

Analysis of the Implementation of Detention Tanks in Urban Lots

Vicente de Sousa Lima Neto¹; Paulo Roberto Lacerda Tavares²; Marco Aurelio Holanda de Castro³; Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral⁴

- ¹ Universidade Regional do Cariri, Departamento de Construção Civil, Juazeiro do Norte/CE, Brasil. Email: vicente.neto@urca.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2177-717X>
- ² Universidade Federal do Cariri, Departamento de Engenharia Civil, Juazeiro do Norte/CE, Brasil. Email: paulo.tavares@ufca.edu.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6702-7975>
- ³ Universidade Federal do Ceará, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Fortaleza/CE, Brasil. Email: marco@ufc.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5134-7213>
- ⁴ Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Engenharia Civil, Recife/PE, Brasil. Email: jaime.cabral@ufpe.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1348-8004>

Resumo: A impermeabilização das bacias hidrográficas aumenta o escoamento superficial e diminui a infiltração de água no solo. Nesse contexto, as inundações urbanas ocorrem com maiores frequências e magnitudes, e podem provocar impactos negativos no meio. Este trabalho avaliou o amortecimento de cheias por meio de reservatórios de detenção nos lotes urbanos instalados na cidade do Crato, Ceará, Brasil. Um sistema de drenagem urbana foi dimensionado e simulações foram realizadas no *software Storm Water Management Model*. A vazão de pico de sub-bacias, vazão de pico e lâminas d'água nas galerias, vazão de pico e volume escoado nos exutórios do sistema foram avaliados a partir de dois cenários: (1) sem a presença de estruturas de amortecimento e (2) com reservatórios de detenção. Os resultados mostraram que os reservatórios de detenção foram capazes de reduzir a vazão de pico nas sub-bacias e nas galerias em média com valores máximos de 83% e 71%, respectivamente, e 52% da lâmina d'água relativa máxima nas galerias. O volume escoado e vazão de pico nos exutórios tiveram reduções máximas de 68% e 69%, respectivamente. Logo, a instalação dessas estruturas possibilitou um melhor gerenciamento do balanço hídrico da bacia hidrográfica, com previsão de diminuição de ocorrências de inundações.

Palavras-chave: Urbanização; Reservatórios de detenção; LID; SWMM.

Abstract: The waterproofing of watersheds increases surface runoff and decreases water infiltration into the soil. In this context, urban floods occur more frequently and with greater magnitudes, which can have negative impacts on the environment. This study evaluated flood attenuation through detention tanks in urban lots installed in the city of Crato, Ceará, Brazil. An urban drainage system was sized and simulations were performed using the Storm Water Management Model software. Peak flow from sub-basins, peak flow and water depths in the stormwater pipes, peak flow and volume discharged from the system outfalls were evaluated under two scenarios: (1) without the presence of attenuation structures and (2) with detention tanks. The results showed that detention tanks were able to reduce peak flow in the sub-basins and stormwater pipes by an average of up to 83% and 71%, respectively, and 52% of the maximum relative water depth in the stormwater pipes. The discharged volume and peak flow at the outfalls had maximum reductions of 68% and 69%, respectively. Therefore, the installation of these structures enabled better management of the watershed's water balance, with a forecasted decrease in flood occurrences.

Keywords: Urbanization; Detention tanks; LID; SWMM.

Recebido: 19/12/2023; Aceito: 29/02/2024; Publicado: 09/04/2024.

1. Introdução

O processo de urbanização tem aumentado a impermeabilização das bacias hidrográficas (FRIAS; MANQUIZ-REDILLAS, 2021). Esse processo, juntamente com as mudanças climáticas, está afetando o ciclo hidrológico (BAEK *et al.*, 2020). No balanço hídrico, nota-se um aumento da parcela de escoamento superficial (FRIAS; MANQUIZ-REDILLAS, 2021) e da vazão de pico, e diminuição da infiltração de água no solo (UCHIYAMA; BHATTACHARYA; NAKAMURA, 2022). Como resultado, há um aumento da probabilidade de ocorrência de inundações urbanas que podem causar perdas econômicas e ameaças à vida (ZHOU *et al.*, 2022), e diminuição do fornecimento dos recursos hídricos em quantidade e qualidade adequados (TUCCI, 2016; NOWOGÓŃSKI, 2020).

Com a finalidade de mitigar os efeitos das inundações urbanas, geralmente são tomadas medidas convencionais de drenagem urbana que fazem referência à concepção higienista do sistema, que tem, por definição, conduzir as águas pluviais o mais rápido possível de um local para um corpo hídrico receptor (ECKART; MCPHEE; BOLISSETTI, 2017), por meio de elementos de microdrenagem, tais como meio-fio, sarjetas, bocas de lobo, tubos de ligação, galerias, juntamente com elementos de macrodrenagem, como rios, canais abertos, dissipadores de energia e bueiros. Porém, o surgimento de novas áreas impermeáveis pode ocasionar uma falha no atual sistema (CIMORELLI *et al.*, 2016; QUICHIMBO-MIGUITAMA *et al.*, 2022).

Para corrigir os efeitos provocados pela falha, geralmente, elementos do sistema de drenagem são substituídos e/ou modificados para atender a nova condição hidráulica, demandando elevados custos financeiros (DRUMOND, 2012), sendo práticas frequentes adotadas no Brasil.

Atualmente, estudos estão sendo desenvolvidos com intuito de tornar a bacia hidrográfica em urbanização com condições mais próximas da hidrologia natural (XIAN *et al.*, 2021) por meio de medidas estruturais, caracterizadas essencialmente por obras de engenharia; e não-estruturais, como a elaboração de planos de gerenciamento de águas pluviais e manejo do solo, seguro contra inundações e educação ambiental (LA LOGGIA; PULEO; FRENI, 2020).

Práticas sustentáveis como *Low Impact Development* (LID) (ZHUANG; LI; LU, 2023), *Water Sensitive Urban Design* (WSUD), *Integrated Urban Water Management* (IUWM), *Sustainable Drainage Systems* (SuDS), *Best Management Practices* (BMPs), *Alternative Techniques* (ATs), *Source Control* (SC) (FLETCHER *et al.*, 2015) e *Green Infrastructure* (GI) (ZHANG; CHUI, 2020) são comumente empregadas no gerenciamento do balanço hídrico da bacia hidrográfica.

Dentre as medidas estruturais para tornar a bacia hidrográfica com condições mais próximas da hidrologia natural, destacam-se os telhados verdes, pavimentos permeáveis, reservatórios de armazenamento de águas de chuva para usos não potáveis, trincheiras de infiltração, células de bioretenção (jardins de chuva), valas e poços de infiltração, reservatórios de retenção de águas pluviais. Essas medidas, executadas de forma isolada ou combinada, possibilitam um aumento da infiltração, evaporação, transpiração, retenção e detenção, diminuição do escoamento superficial com consequente redução da vazão de pico e possíveis usos não potáveis de águas de chuva (QIN, 2020).

O *Storm Water Management Model* (SWMM) da *U.S. Environmental Protection Agency* (EPA) destaca-se como uma ferramenta para a modelagem hidrológica (PANOS; WOLFAND; HOGUE, 2020). Variáveis como tamanho; número de unidades; localização na bacia hidrográfica; escolha e combinações das práticas LID; e custos de instalação, operação e manutenção podem ser avaliados com auxílio dessa e de outras ferramentas computacionais, favorecendo de forma considerável à tomada de decisão (ECKART; MCPHEE; BOLISSETTI, 2017), assim como a automatização dos processos envolvidos na detenção por meio dos denominados “sistemas inteligentes” (DI MATTEO *et al.*, 2019) e controle em tempo real (ALTOBELLI; EVANGELISTI; MAGLIONICO, 2024).

Este trabalho teve por objetivo analisar o amortecimento de cheias por meio de reservatórios de retenção nos lotes urbanos instalados na cidade do Crato, Ceará, Brasil, realizando a composição de dois cenários. O primeiro foi composto por um sistema convencional de drenagem urbana e o segundo cenário com o acréscimo de medidas de baixo impacto (LID) do tipo reservatórios de retenção instalados nos lotes urbanos.

2. Metodologia

O município do Crato está localizado ao sul do estado do Ceará, Brasil (7°14'03'' S e 39°24'34'' WGr), com área de 1138,15 km² e população residente de 131050 habitantes (IBGE, 2023). Possui um clima tropical quente semiárido brando e tropical quente subúmido, precipitação média anual de 1091 mm, evapotranspiração potencial (EP) média anual de 1428 mm e temperatura média entre 24 e 26 °C. Próximo à Chapada do Araripe, Crato apresenta solos do tipo Argissolo, Latossolo e Neossolo e vegetação Carrasco, Floresta Caducifólia Espinhosa (Caatinga Arbórea), Floresta Subcaducifólia

Tropical Pluvial (Mata Seca), Floresta Subcaducifólia Tropical Xeromorfa (Cerradão), Floresta Subperenifólia Tropical Pluvio-Nebular (Mata Úmida) (IPECE, 2012).

O bairro Mirandão foi escolhido como objeto de pesquisa por estar distante de áreas urbanizadas e pela existência de estudos acadêmicos já realizados, como o de Feitosa (2015).

Em posse das curvas de níveis e imagem de arruamento (Figura 1), o bairro Mirandão foi dividido em 8 partes (Figura 2). Cada parte pode ser constituída por várias sub-bacias e classificadas em dois grupos: Quadras (neste trabalho remete-se a quantidade de lotes que produz escoamento suficiente para preencher a seção da sarjeta) e Ruas Asfaltadas. A delimitação de cada sub-bacia foi realizada manualmente no AutoCAD com o auxílio do *software* UFC8 pertencente ao Sistema UFC (BEZERRA; CASTRO, 2009).



Figura 1 – Arruamento do Bairro Mirandão, Crato, Ceará, Brasil.
Fonte: Google Earth Pro (2020.)

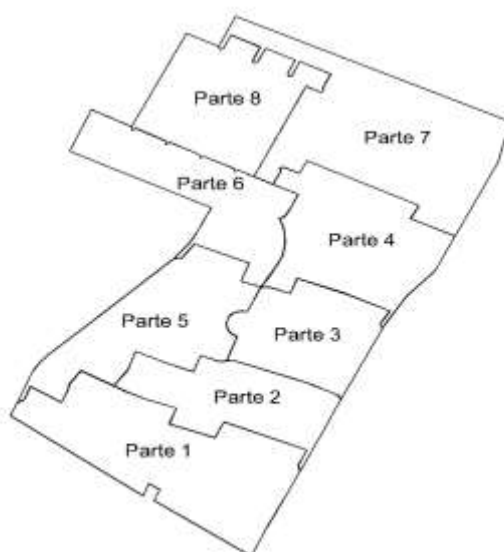


Figura 2 – Partes do bairro Mirandão.
Fonte: O autor (2021).

Os parâmetros hidráulicos e hidrológicos foram definidos para cada sub-bacia a depender do seu grupo (Tabela 1). Estes parâmetros, de uma forma geral estão relacionados à permeabilidade da superfície e, em específico, o coeficiente de escoamento superficial (C) e o *Curve Number* (CN) são adimensionais correspondentes à cobertura do solo e a abstração inicial (I_a) se refere a um percentual da máxima infiltração acumulada potencial (S_R) de infiltração a partir da qual se processa a avaliação.

Tabela 1 – Parâmetros hidráulicos e hidrológicos adotados.

Grupo	Parâmetros da bacia de contribuição		
	Coefficiente de escoamento superficial, C	Curve Number, CN	Abstração Inicial, I_a
Quadras	0,60	80	$0,2 \cdot S_R$
Ruas asfaltadas	0,95	98	$0,2 \cdot S_R$

Fonte: Tucci (1995).

Posteriormente à delimitação de cada sub-bacia, o programa UFC8 (BEZERRA; CASTRO, 2009) foi usado para calcular os parâmetros morfométricos, tais como: área (A_B), comprimento do rio principal em quilômetros (L), desnível máximo em metros (ΔH), largura do fluxo superficial em metros e o tempo de concentração em minutos pela equação de Kirpich (t_c) válida para áreas inferiores a 1 km^2 (Eq. 1).

$$t_c = 57 \cdot \left(\frac{L^3}{\Delta H} \right)^{0,385} \quad (1)$$

O Método Racional foi escolhido para o cálculo da vazão de pico da sub-bacia (Eq. 2) devido às áreas serem inferiores a 1 km^2 .

$$Q_P = \frac{C \cdot i \cdot A_B}{3,6} \quad (2)$$

Em que:

Q_p = vazão de pico da sub-bacia, em m³/s;

C = coeficiente de escoamento superficial, adimensional;

i = intensidade de chuva, em mm/h;

A_B = área da sub-bacia, em Km².

A intensidade de chuva foi determinada pela equação Intensidade-Duração-Frequência (IDF) (Eq. 3).

$$i = \frac{31,86 \cdot (Tr - 2,08)^{0,0896}}{(t_d + 9,8325)^{0,7939}} \quad (3)$$

Em que:

i = intensidade de chuva, em mm/h;

Tr = período de retorno, em anos;

t_d = duração da chuva, em minutos.

O tempo de concentração de cada sub-bacia (Eq. 1) foi inferior a 10 minutos, logo o tempo de duração da chuva de projeto foi considerado igual a 10 minutos, conforme recomendado pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (BRASIL, 2006). A escolha do período de retorno tem relação com a análise da frequência com que um evento chuvoso pode ser igualado ou superado, determinando, portanto, o porte da obra de mitigação. A recorrência de solicitação de um sistema varia numa proporção inversa ao período de retorno. Sistemas de macrodrenagem são executados para suportar maiores vazões, que devem acontecer com menor frequência, ou seja, maiores períodos de retorno e a redução das vazões indicam uma inversão dessa análise, caso em que são aplicados períodos de retorno menores para estruturas de microdrenagem. Dessa forma, por se tratar de um sistema de microdrenagem, o período de retorno escolhido foi igual a 10 anos (SÃO PAULO, 2012).

Em seguida, o traçado manual de tubos de ligação de concreto conectou o exutório das sub-bacias às galerias de concreto. Os poços de visita foram inseridos de forma automática. As equações de *Saint Venant* do modelo de onda dinâmica (Eq. 4 e 5) foram utilizadas no dimensionamento dos condutos.

Na aba de dimensionamento do Sistema UFC8, as declividades mínima e máxima das tubulações foram adotadas iguais a 0,5% e 7,5%, respectivamente; velocidade máxima no conduto igual a 5 m/s; degrau mínimo igual a 5 cm; lâmina máxima nos condutos igual a 100% e folga mínima entre o conduto e o obstáculo igual 15 cm; recobrimento mínimo igual a 1 m e não permitindo a diminuição de diâmetros a jusante.

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q_v}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial Q_v}{\partial t} + \frac{\partial \left(\frac{Q_v^2}{A} \right)}{\partial x} + g \cdot A \cdot \frac{\partial Y}{\partial x} + g \cdot A \cdot (S_f - S_0) = 0 \quad (5)$$

Em que:

x = distância, [L];

t = tempo, [T];

A = área molhada, [L²];

Q_v = vazão volumétrica, [L³.T⁻¹];

$H = (Z + Y)$ = energia ou carga total, [L];

Z = energia ou carga de posição, [L];

Y = energia ou carga hidráulica, [L];

S_f = declividade da linha de energia ou perda de carga por unidade de comprimento;

$S_0 = -\frac{\partial z}{\partial x}$ = declividade do conduto;

g = aceleração da gravidade, [L.T⁻²];

O *Storm Water Management Model* (SWMM) é um modelo dinâmico (distribuído) com aplicações, por exemplo, no projeto e dimensionamento de sistemas de drenagem, controle de inundações e qualidade de água e avaliação de desempenho de técnicas compensatórias.

Com o sistema de drenagem urbana dimensionado pelo UFC8, os arquivos de simulação no SWMM foram gerados para cada uma das oito partes (Figura 2). No SWMM, o balanço hídrico na sub-bacia é realizado por meio do modelo de reservatório não linear e considera o regime uniforme de escoamento na sub-bacia em direção a um canal retangular de largura (W), altura ($d - d_s$), declividade (S) e coeficiente de rugosidade de Manning (n) (ROSSMAN, 2015).

Logo, pela conservação da massa, a variação da profundidade (d) no tempo (dt) na sub-bacia é dada pela equação diferencial não linear (Eq. 6):

$$\frac{dd}{dt} = p - e - f - \frac{S^{1/2} \cdot W}{n \cdot A_B} \cdot (d - d_s)^{5/3} \quad (6)$$

Em que:

p = taxa de precipitação por unidade de área ($\frac{m}{s}$);

e = taxa de evaporação da superfície por unidade de área ($\frac{m}{s}$);

f = taxa de infiltração por unidade de área ($\frac{m}{s}$);

n = coeficiente de rugosidade de Manning ($\frac{s}{m^{1/3}}$);

A_B = área da sub-bacia (m^2);

O modelo de infiltração escolhido foi baseado no valor do *Curve Number* (CN) desenvolvido pelo *Natural Resource Conservation Service* ($NRCS$), com valores inseridos para cada sub-bacia (Tabela 1). A propagação do escoamento nos nós e condutos é realizada por meio da resolução das equações de *Saint Venant* unidimensionais (Eqs. 4 e 5).

No SWMM, os reservatórios de detenção podem ser representados apenas pela camada de armazenamento, junto com o dreno e possível escoamento devido ao extravasamento, sem a presença de precipitação diretamente sobre a área, por estar fechada e a camada de fundo ser impermeável (Figura 3).

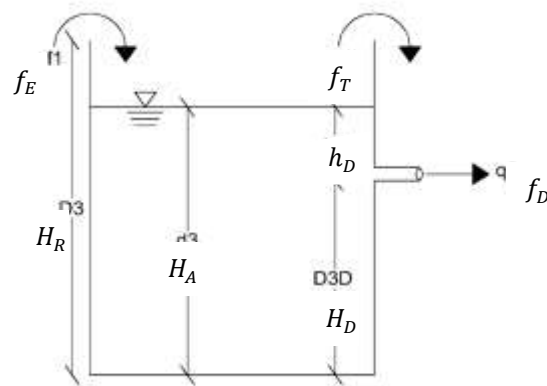


Figura 3 – Modelo de simulação de reservatórios de detenção no SWMM.

Fonte: O autor (2021).

O balanço hídrico no reservatório de detenção é dado pela Eq. 7:

$$\frac{dH_A}{dt} = f_E - f_T - f_D \quad (7)$$

Em que:

H_A = Altura de água no reservatório, em mm;

dt = Intervalo de tempo, em horas;

f_E = fluxo de entrada no reservatório, em mm/h;

f_T = fluxo de transbordamento, em mm/h;

f_D = fluxo de saída pelo dreno, mm/h;

H_R = altura do reservatório, em mm;

H_D = altura de deslocamento do dreno, em mm;

h_D = altura d'água que produzirá escoamento pelo dreno, em mm.

O funcionamento do reservatório é dado pelas seguintes condições:

- $h_D = 0$ para $H_A \leq H_D$;
- $h_D = H_A - H_D$ para $H_D < H_A \leq H_R$.

O fluxo de saída pelo dreno (f_D) em um intervalo de tempo (Δt) é limitado pelo volume de água armazenado no reservatório (Eq. 8):

$$f_D = \text{mín} \left[f_D, \frac{H_A}{\Delta t} \right] \quad (8)$$

O SWMM permite que o dreno esteja fechado antes de um evento de chuva e, em seguida, aberto em uma quantidade de horas estipulada após o seu término. O fluxo de entrada no reservatório (f_E) é definido pela Eq. 9:

$$f_E = \text{mín} \left[q_0, \frac{(H_R - H_A)}{\Delta t} + f_D \right] \quad (9)$$

Por fim, o fluxo de transbordamento (f_T) ocorre quando a quantidade capturada do escoamento da área tratada (q_0) é maior do que o fluxo de entrada (f_E) (Eq. 10):

$$f_T = \text{máx}[0, q_0 - f_E] \quad (10)$$

O fluxo de saída pelo dreno (f_D) é dado por (Eq. 11):

$$f_D = \alpha \cdot h_D^\beta \quad (11)$$

Em que:

α = parâmetro do dreno, com dimensão: $\frac{\text{mm}^{(1-\beta)}}{\text{h}}$;

β = expoente do dreno, adimensional.

Quando o expoente do dreno é igual a 0,5, o mesmo funciona como orifício ou tubo, logo, tem-se (Eqs. 12 e 13):

$$\alpha = C_d \cdot \left(\frac{A_D}{A_R}\right) \cdot \sqrt{2 \cdot g} \quad (12)$$

$$f_D = \alpha \cdot h_D^{0,5} \quad (13)$$

Em que:

A_R = área da base do reservatório, em m²;

A_D = área de abertura do dreno, em m²;

g = aceleração da gravidade, em mm/h²;

C_d = coeficiente de descarga do dreno, adotado 0,6 no manual técnico da EPA.

Pelas equações 12 e 13, observa-se que o fluxo de saída pelo dreno é caracterizado pela vazão de saída por unidade de área da base do reservatório. Na janela de edição de controle LID do SWMM, o diâmetro de 1,5 m foi escolhido para o reservatório de detenção, justificado pela disponibilidade no mercado da construção civil. A altura do reservatório (H_R) foi simulada de 0 a 3 m, a cada 0,5 m, sendo o valor 0 m representado pelo sistema de drenagem sem os reservatórios. O parâmetro (α) e expoente do dreno (β), altura de deslocamento (H_D) e tempo em que o dreno permanece fechado foram definidos iguais a 0. A justificativa para essas escolhas deve-se ao fato de que o reservatório receberá a contribuição da sub-bacia do tipo Quadras e ao longo do tempo a altura de água no mesmo poderá elevar-se até a altura máxima (H_R) (Figura 3). Caso não haja mais capacidade de armazenamento, o escoamento será direcionado para o exutório da sub-bacia por transbordamento (f_T), seguindo a equação 7. O parâmetro de porcentagem de área tratada foi definido igual a 100, para que o escoamento de toda área impermeável da sub-bacia fosse direcionado ao reservatório.

Dessa forma, o hidrograma das sub-bacias e das galerias, a vazão de pico e o volume escoado nos exutórios do sistema foram avaliados para o cenário composto por um sistema convencional de drenagem urbana e o cenário com o acréscimo de medidas de baixo impacto (LID) do tipo reservatórios de detenção instalados nos lotes urbanos.

3. Resultados e discussão

Após a delimitação e escolha dos parâmetros hidrológicos de cada sub-bacia, o sistema de drenagem foi dimensionado e o arquivo de entrada para simulações no SWMM foi gerado. Em seguida, os reservatórios de detenção nos lotes das sub-bacias do tipo Quadras foram inseridos (Tabela 2).

Tabela 2 – Características das subáreas.

Subárea	Área total (hectares)	Total de sub-bacias	Total de sub-bacias do tipo Quadras	Lotes com reservatório
Parte 1	4,98	81	32	175
Parte 2	2,62	44	16	97
Parte 3	2,55	33	6	42
Parte 4	3,61	43	19	119
Parte 5	3,50	53	19	117
Parte 6	2,95	47	14	83
Parte 7	5,55	76	27	173
Parte 8	3,36	51	21	160

Fonte: O autor (2021).

3.1 Sub-bacias

As alturas do reservatório de detenção de 300 cm, 250 cm, 200 cm, 150 cm e 100 cm reduziram a vazão de pico das sub-bacias em média no intervalo de 75% a 83%, 65% a 83%, 36% a 79%, 14% a 41% e 2% a 10%, respectivamente. A altura de 50 cm foi considerada ineficaz, pois a redução percentual de vazão de pico nas sub-bacias foi nula.

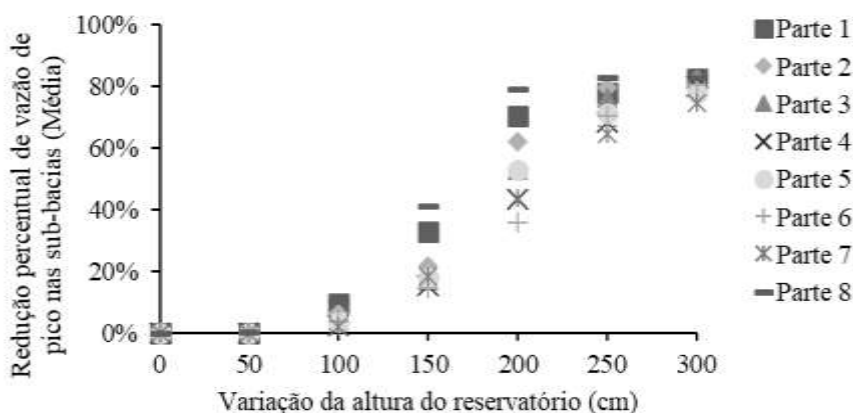


Figura 4 – Reduções percentuais de vazão de pico nas sub-bacias.

Fonte: O autor (2021).

Em relação à altura de 100 cm, as reduções máxima e mínima foram identificadas nas Partes 8, e 4 e 7, respectivamente. Acerca da altura do reservatório de 150 cm, a parte 8, novamente, apresentou a maior redução percentual em relação as demais subáreas, e o valor mínimo foi encontrado na parte 6. O reservatório com 200 cm de altura reduziu a vazão de pico em valores percentuais acima de 40% nas subáreas, exceto na parte 6 com valor de 36%. A altura de 250 cm reduziu a vazão de pico em valores percentuais iguais ou superiores a 70%, salvo nas Partes 4 e 7 com 68% e 65%, respectivamente.

A Parte 8 proporcionou as maiores reduções percentuais em relação as outras subáreas. Isso pode ser justificado por ela apresentar, aproximadamente, 47 lotes com reservatório por área total.

3.2 Galerias

Em relação a vazão de pico nas galerias, os resultados mostraram que as menores reduções foram encontradas na parte 3 com valores iguais ou inferiores a 11%, pela justificativa de possuir uma razão de 16 lotes com reservatório por área total, menor valor dentre os demais. Excluindo a mesma, as reduções variaram entre os limites mínimos e máximos em 49% a 71%, 44% a 71%, 34% a 70%, 16% a 51%, 6% a 15%, 0% a 2% para as alturas de 300, 250, 200, 150, 100 e 50 cm, respectivamente (Figura 5).

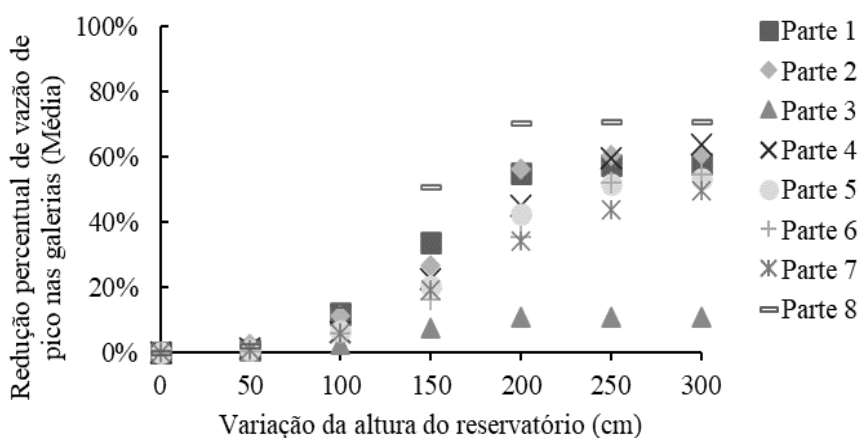


Figura 5 – Reduções percentuais de vazões de pico nas galerias.

Fonte: O autor (2021).

As menores reduções percentuais de lâmina d'água relativa máxima nas galerias (Figura 6) situaram-se na parte 3 com reduções iguais ou inferiores a 8%. Em relação às outras partes estudadas, as reduções percentuais de lâmina d'água relativa máxima variaram entre limites mínimos e máximos de 36% e 52%, 34% e 52%, 23% e 52%, 11% e 37%, 4% e 11%, 0% e 2% para as alturas de 300, 250, 200, 150, 100 e 50 cm, respectivamente.

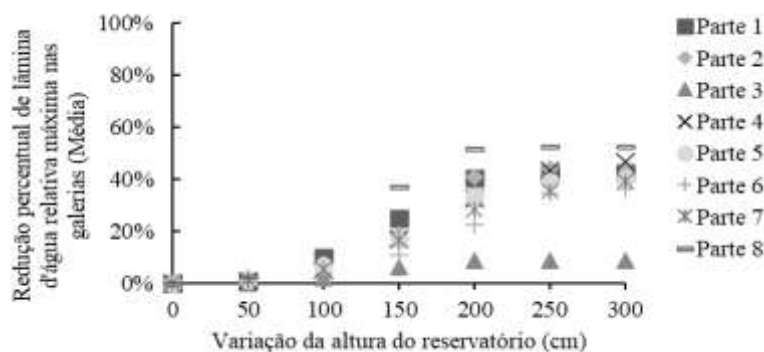


Figura 6 – Reduções percentuais de lâmina d'água relativa máxima nas galerias.

Fonte: O autor (2021).

Os resultados evidenciam que a implantação de reservatórios de lotes possibilita a redução do diâmetro no dimensionamento das galerias. A magnitude da redução do diâmetro depende da escolha do tamanho do reservatório para o local em estudo. Nas subáreas 1, 2, 3 e 8, a altura do reservatório de 200 cm pode ser considerada a otimizada, pois as alturas de 250 e 300 cm reduziram a vazão de pico e lâmina d'água relativa máxima nas galerias no máximo 5%. Seguindo o mesmo critério, a altura de 250 cm é adotada como a otimizada nas subáreas 4, 5, 6 e 7. Portanto, observa-se que o nível de água na estrutura de detenção estabilizou-se. Alturas otimizadas indicam que, para tais limites, reservatórios maiores são desnecessários, pois passam a não mais representarem mudanças na redução da altura de lâmina d'água e vazão de pico. Porém, ressalta-se que a escolha da altura do reservatório depende da eficiência a ser atingida.

3.3 Exutórios

Os hidrogramas nos exutórios (Figuras 7 a 14) mostraram, evidentemente, a redução da vazão de pico (Figura 15) e do volume escoado (Figura 16). O tempo de pico sem as estruturas de detenção foi igual a 9, 8, 8, 10, 9, 9, 11 e 9 minutos para as subáreas 1 a 8, respectivamente. Com os reservatórios, o tempo de pico nos exutórios variou entre 8 e 13 minutos, com amortecimento de no máximo 2 minutos. Nas situações em que o nível de água no reservatório estava estabilizado (Partes 1, 2, 3, 6 e 8: Altura do reservatório 250 e 300 cm), com captura de toda a precipitação na área impermeável do lote, a vazão nos exutórios foi decorrente do escoamento nas sub-bacias Ruas Asfaltadas. Para esses casos, o tempo de pico nos exutórios ocorreu no mesmo instante do tempo de pico das sub-bacias Ruas Asfaltadas.

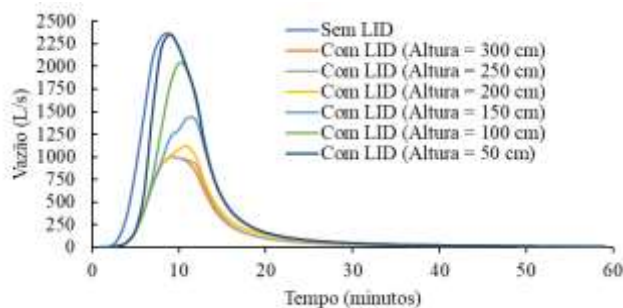


Figura 7 – Hidrogramas no exutório da parte 1.

Fonte: O autor (2021).

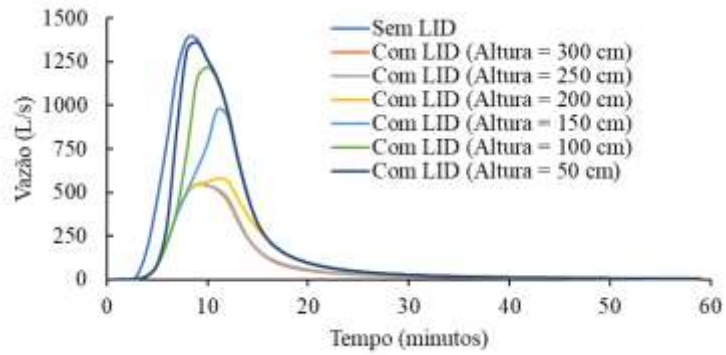


Figura 8 – Hidrogramas no exutório da parte 2.
Fonte: O autor (2021).

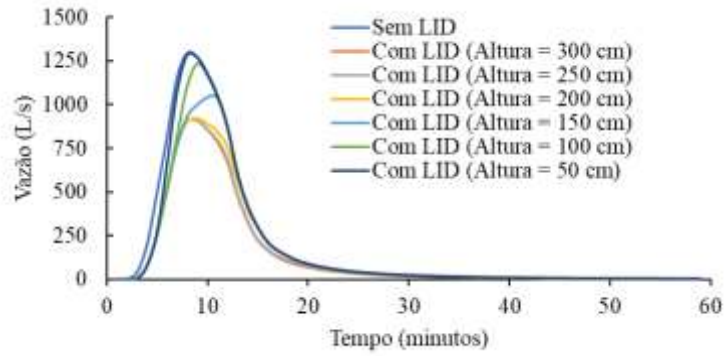


Figura 9 – Hidrogramas no exutório da parte 3.
Fonte: O autor (2021).

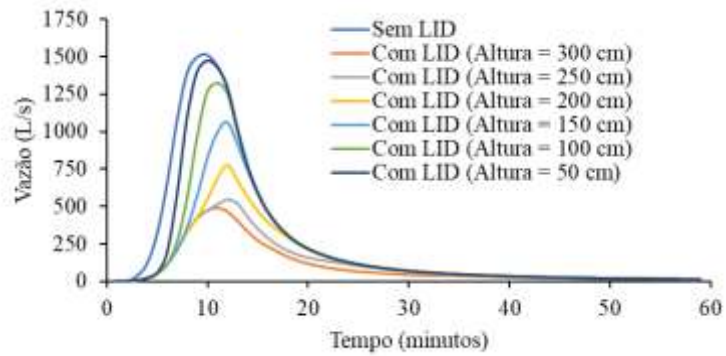


Figura 10 – Hidrogramas no exutório da parte 4.
Fonte: O autor (2021).

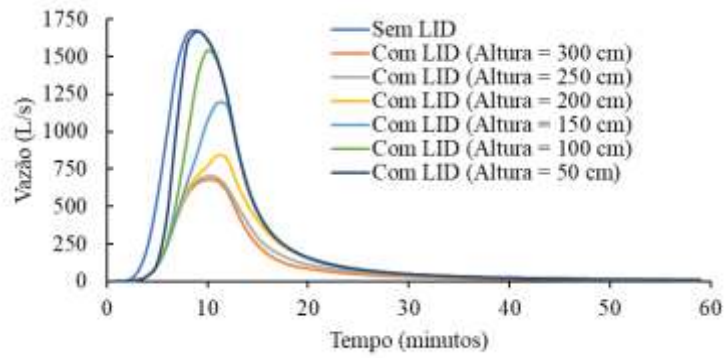


Figura 11 – Hidrogramas no exutório da parte 5.
Fonte: O autor (2021).

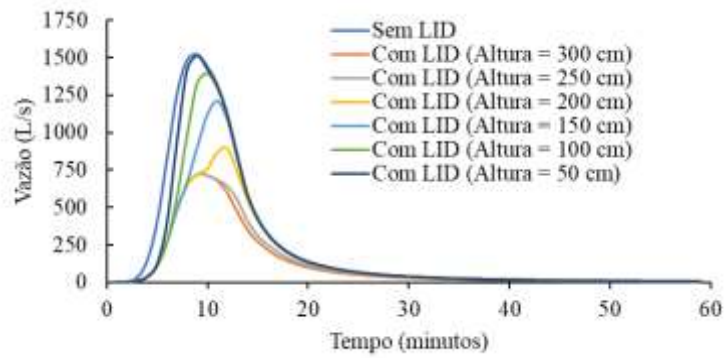


Figura 12 – Hidrogramas no exutório da parte 6.
Fonte: O autor (2021).

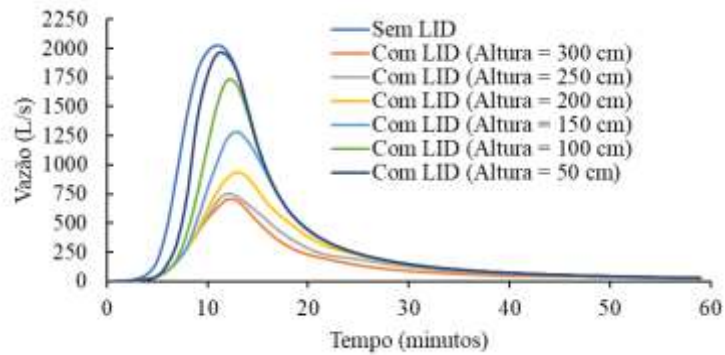


Figura 13 – Hidrogramas no exutório da parte 7.
Fonte: O autor (2021).

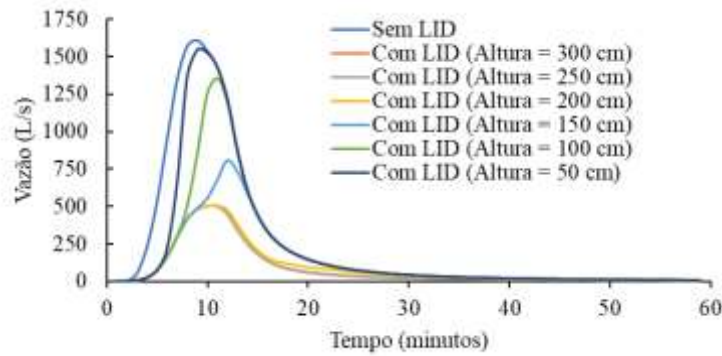


Figura 14 – Hidrogramas no exutório da parte 8.
Fonte: O autor (2021).

A vazão de pico no exutório das partes 1 a 8 na situação sem implantação dos reservatórios de detenção foram iguais a 2388,89; 1405,83; 1304,29; 1511,37; 1686,39; 1534,74; 2031,33 e 1617,41 L/s, respectivamente. No cenário de implantação LID do tipo reservatórios de detenção, a vazão de pico no exutório das partes 1 a 8 variou entre o limite mínimo (altura do reservatório de 300 cm) e máximo (altura do reservatório de 50 cm) de 995,90 a 2359,53 L/s; 547,42 a 1376,84 L/s; 920,60 a 1297,61 L/s; 490,03 a 1475,35 L/s; 680,55 a 1672,44 L/s; 724,29 a 1513,33 L/s; 714,41 a 1957,72 L/s; 506,73 a 1561,05 L/s, respectivamente. As reduções percentuais de vazão de pico (Figura 15) para as partes 1 a 8 foram iguais no intervalo de 1% a 58%; 2% a 61%; 1% a 29%; 2% a 68%; 1% a 60%; 1% a 53%; 4% a 65%; 3% a 69%, respectivamente.

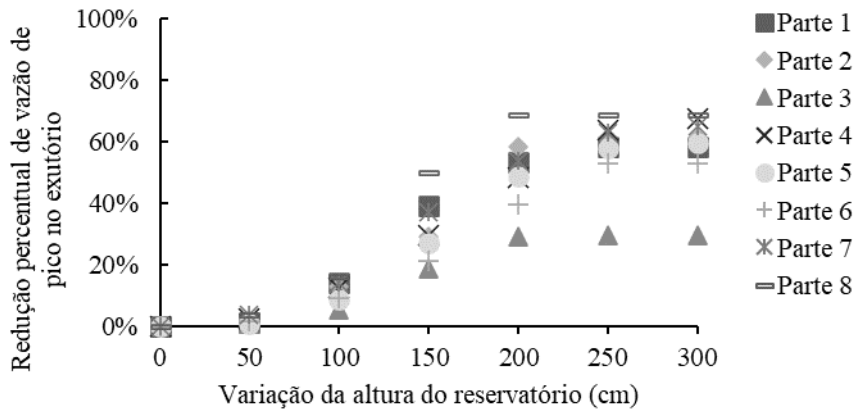


Figura 15 – Reduções percentuais de vazão de pico no exutório.
Fonte: O autor (2021).

Com a instalação de reservatórios de detenção nos lotes, conforme apresentado na Figura 16, o volume escoado no exutório das partes 1 a 8 reduziu no intervalo de 13% a 56%; 12% a 59%; 6% a 29%; 12% a 63%; 11% a 58%; 9% a 49%; 11% a 61%; 6% a 68%, respectivamente, com valores mínimos referentes à altura 50 cm e valor máximo 300 cm.

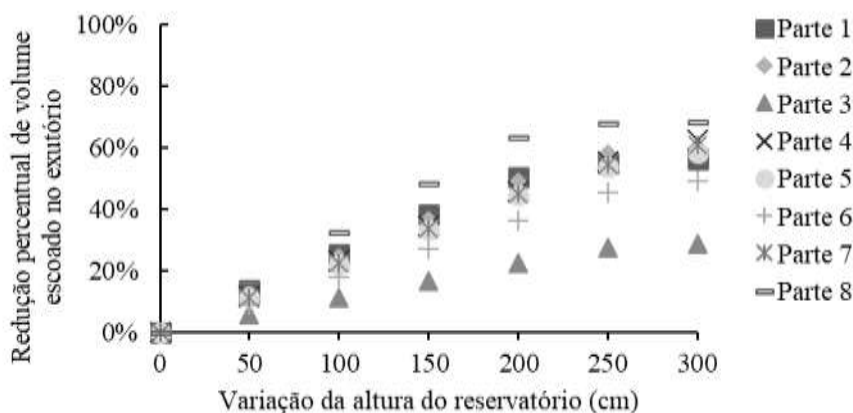


Figura 16 – Reduções percentuais de volume escoado no exutório.

Fonte: O autor (2021).

As análises revelaram que nos exutórios a eficiência de cada parte estudada não foi alterada em algumas situações de aumento da altura do reservatório, pois o nível de água no mesmo estabilizou-se, com o reservatório amortecendo toda a vazão da área impermeável do lote, com escoamento direcionado ao exutório, principalmente, decorrente das ruas asfaltadas. Portanto, a presença de tendência de um patamar indicou a altura do reservatório otimizada do ponto de vista hidráulico. Deste modo, as alturas otimizadas são 200, 200, 200, 250, 250, 250, 250 e 200 para as partes 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8, respectivamente.

Feitosa (2015) analisou a implantação de trincheiras de infiltração com seção transversal quadrada de 1,00x1,00 m no passeio público no bairro Mirandão, Crato, CE. Os resultados das simulações demonstraram que o uso dessa técnica LID reduziu a vazão de pico nos lotes em pelo menos 70%, além de proporcionar o aumento da recarga dos aquíferos. Entretanto, para o funcionamento adequado do sistema, um controle de manutenção rígido deve ser elaborado, com a finalidade de diminuir os riscos de colmatação. Pochwat e Pizzo (2022) realizaram simulações no SWMM com o intuito de avaliar a redução do volume de águas pluviais escoado para o sistema de drenagem com a utilização de reservatórios de retenção automatizados ligados em série ou paralelo, e concluíram que, na maioria das análises laboratoriais, essas estruturas reduziram a quantidade de água acima de 40%, 67% e 83% para a área dos reservatórios 2 m², 4 m² e 10 m², respectivamente.

Apesar de existirem diferenças executivas com as trincheiras de infiltração, os reservatórios de retenção mostram-se como uma alternativa no controle do escoamento de águas urbanas, conforme demonstrado pelos resultados desta pesquisa e de Pochwat e Pizzo (2022), sendo a magnitude da eficiência do sistema influenciada, principalmente, pela área de captação de águas pluviais e pela chuva de projeto.

4. Considerações finais

O presente trabalho comparou dois cenários de escoamento de águas pluviais urbanas no bairro Mirandão, cidade do Crato, Ceará, Brasil. O primeiro cenário foi composto por um sistema convencional de drenagem urbana e o segundo cenário com o acréscimo de medidas de baixo impacto (LID) do tipo reservatórios de retenção instalados nos lotes. Essas estruturas LID amorteceram a vazão de pico nas sub-bacias, reduziram a lâmina d'água relativa máxima nas galerias, assim como o volume escoado e a vazão de pico nos exutórios. Custos de implantação, operação e manutenção não foram avaliados.

A utilização de técnicas LID do tipo reservatórios de retenção nos lotes mostrou-se eficaz no ponto de vista hidráulico. Consequentemente, menores lâminas e volume de água são escoados na rede de drenagem, possibilitando um melhor gerenciamento do balanço hídrico da bacia urbanizada e diminuindo possíveis ocorrências de inundações. Além disso, os sistemas de drenagem podem ser dimensionados com menores vazões, aliado a menores custos.

Simulações hidrodinâmicas no SWMM podem contribuir na gestão de águas pluviais, como a definição de volumes mínimos de retenção e infiltração e combinações de diferentes estruturas sustentáveis no espaço urbano. Como

recomendações para trabalhos futuros, o aprofundamento em análises de custo-benefício, critérios de responsabilização para implantação, operação e manutenção dos sistemas e locação das estruturas podem ser avaliados.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP).

Referências

- ALTOBELLI, M.; EVANGELISTI, M.; MAGLIONICO, M. Multi-Objective Performance of Detention Basins and Rainwater Harvesting Systems Using Real-Time Controls with Rainfall Forecasts. *Water*, v. 16, n. 1, 2024. <https://doi.org/10.3390/w16010071>.
- BAEK, S. -S et al. A novel water quality module of the SWMM model for assessing low impact development (LID) in urban watersheds. *Journal of Hydrology*, v. 586, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124886>.
- BEZERRA, A. A.; CASTRO, M. A. H. *Software para Elaboração de Projetos de Drenagem Urbana Envolvendo AutoCAD e SWMM, XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, 2009.
- BRASIL. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisa Rodoviárias. *Manual de drenagem de Rodovias*. 2 ed. Rio de Janeiro, 2006. 333 p. (IPR. Publ., 724).
- CIMORELLI, L. et al. Optimal positioning and sizing of detention tanks within urban drainage networks. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v. 142, n. 1, p. 1–12, 2016. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000927](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000927).
- DI MATTEO, M. et al. Controlling rainwater storage as a system: An opportunity to reduce urban flood peaks for rare, long duration storms. *Environmental Modelling & Software*, v. 111, 34-41, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.09.020>.
- DRUMOND, P. de P. *Estudo da influência da reservação de águas pluviais em lotes no município de Belo Horizonte, MG: Avaliação hidráulica e hidrológica*. Belo Horizonte, 2012. 184f. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte-BH, 2012.
- ECKART, K.; MCPHEE, Z.; BOLISSETTI, T. Performance and implementation of low impact development – A review. *Science of the Total Environment*, v. 607–608, p. 413–432, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.06.254>.
- FEITOSA, F. F. S. *Avaliação do uso de trincheiras de infiltração para atenuação de picos de cheia utilizando o SWMM*. Fortaleza, 2015. 101f. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (Recursos Hídricos), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE, 2015.
- FLETCHER, T. D. et al. SUDS, LID, BMPs, WSUD and more – The evolution and application of terminology surrounding urban drainage. *Urban Water Journal*, v. 12, n. 7, p. 525–542, 2015. <https://doi.org/10.1080/1573062X.2014.916314>.
- FRIAS, R. A.; MANQUIZ-REDILLAS, M. Modelling the applicability of Low Impact Development (LID) technologies in a university campus in the Philippines using Storm Water Management Model (SWMM). *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 2021. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1153/1/012009>.
- GOOGLE EARTH PRO, 2020. Disponível em: <https://www.google.com/earth/about/versions/#download-pro>. Acesso em: 15/04/2020.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2023. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ce/crato/panorama>. Acesso em: 20/10/2023.

-
- IPECE. Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará, 2012. Disponível em: <https://www.ipece.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/45/2013/01/Crato.pdf>. Acesso em: 25/06/2020.
- LA LOGGIA, G.; PULEO, V.; FRENI, G., 2020. Floodability: A New Paradigm for Designing Urban Drainage and Achieving Sustainable Urban Growth. *Water Resources Management*, v. 34, 3411-3424, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11269-020-02620-6>.
- NOWOGÓŃSKI, I. Low impact development modeling to manage urban stormwater runoff: case study of Gorzów Wielkopolski. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, v. 28, n. 3, 105-115, 2020. <https://doi.org/10.3846/jeelm.2020.12670>.
- PANOS, C. L.; WOLFAND, J. M.; HOGUE, T. S. SWMM Sensitivity to LID Siting and Routing Parameters: Implications for Stormwater Regulatory Compliance. *Journal of the American Water Resources Association*, v. 56, n. 5, 790-809, 2020. <https://doi.org/10.1111/1752-1688>.
- POCHWAT, K.; PIZZO, H. Analysis of the Hydraulic Efficiency of a Steerable Detention Tank—Simulation Studies. *Hydrology*, v. 9, n. 12, 2022. <https://doi.org/10.3390/hydrology9120217>.
- QIN, Y. Urban Flooding Mitigation Techniques: A Systematic Review and Future Studies. *Water*, v. 12, n. 12, 2020. <https://doi.org/10.3390/w12123579>.
- QUICHIMBO-MIGUITAMA, F. et al. Influence of Low-Impact Development in Flood Control: A Case Study of the Febres Cordero Stormwater System of Guayaquil (Ecuador). *Sustainability*, v. 14, n. 12, 2022. <https://doi.org/10.3390/su14127109>.
- ROSSMAN, L. A. *Storm Water Management Model (SWMM) User's Manual Version 5.1*, 2015.
- SÃO PAULO (cidade). Secretaria Municipal de Desenvolvimento Urbano. *Manual de drenagem e manejo de águas pluviais: aspectos tecnológicos; fundamentos*. São Paulo: SMDU, 2012. 220 p. v. 2.
- TUCCI, C. E. M.; PORTO, R. L L.; BARROS, M. T. *Drenagem Urbana*. 1. ed. Porto Alegre: ABRH/Editora da UFRGS, 1995.
- TUCCI, C. E. M. Urbanization and water resources. In: Waters of Brazil: Strategic Analysis. *Springer International Publishing*, 2016. p. 89-104.
- UCHIYAMA, S.; BHATTACHARYA, Y.; NAKAMURA, H. Efficacy Analysis of Urban Planning Scenarios for Flood Mitigation with Low Impact Development Technologies Using SWMM: A Case Study in Saitama City, Japan. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, v. 973, 2022. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/973/1/012012>.
- XIAN, B. C. C. et al. Evaluation of low impact development and best management practices on peak flow reduction using SWMM. *International Conference on Civil and Environmental Engineering*, v. 646, 2021. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/646/1/012045>.
- ZHANG, K.; CHUI, T. F. M. Assessing the impact of spatial allocation of bioretention cells on shallow groundwater – An integrated surface-subsurface catchment-scale analysis with SWMM-MODFLOW. *Journal of Hydrology*, v. 586, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124910>.
- ZHOU, Y. et al. Evaluating the Impact of Low Impact Development Practices on the Urban Flooding over a Humid Region of China. *Journal of the American Water Resources Association*, v.58, n. 6, 1264-1278, 2022. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.13032>.
- ZHUANG, Q.; LI M.; LU, Z. Assessing runoff control of low impact development in Hong Kong's dense community with reliable SWMM setup and calibration. *Journal of Environmental Management*, v. 345, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118599>.