

## CAPÍTULO 2

# MODELAGEM HIDROLÓGICA COM USO DE MICRO RESERVATÓRIOS NA SUB BACIA PE11 EM TERESINA – PI

---

*Data de submissão: 21/09/2024*

*Data de aceite: 01/10/2024*

### **Girleiane Santos de Sá**

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí – IFPI  
Teresina – Piauí  
<https://lattes.cnpq.br/6778472819095045>

### **Mauro César de Brito Sousa**

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí – IFPI  
Teresina – Piauí  
<http://lattes.cnpq.br/2049460389729603>

**RESUMO:** O rápido aumento da impermeabilidade da superfície e os eventos extremos de chuva induzidos pelas mudanças climáticas tornam a expansão e modernização do sistema de drenagem existente um desafio, uma vez que esses métodos não atendem às aspirações de desenvolvimento urbano sustentável. Para que se tenha um manejo eficiente das águas pluviais urbanas e tornar a urbanização mais segura e sustentável, é fundamental a realização do controle das inundações, no entanto, é necessário conhecer as propriedades do ciclo hidrológico local, bem como dimensionar o impacto gerado pela aplicação das técnicas de drenagem. Em face disso, este trabalho analisou o

comportamento hidrológico da sub-bacia PE11 e o consequente impacto da aplicação de micro reservatórios para tratamento da área de telhados, que representa 23,45% da área impermeável e 34,28% da área total da sub-bacia. Para simulações com TR de 5 anos e 10 anos, os resultados mostraram reduções, no pico de vazão, de até 16,43% e 14,59% respectivamente. Enquanto o volume escoado no exutório da sub-bacia foi reduzido em até 2,67% e 2,31% respectivamente.

**PALAVRAS-CHAVE:** Micro reservatórios, SWMM, Drenagem Urbana, sustentável.

### **HYDROLOGICAL MODELING USING MICRO RESERVOIRS IN THE PE11 SUB-BASIN IN TERESINA – PI**

**ABSTRACT:** The rapid increase in surface impermeability and extreme rainfall events induced by climate change make the expansion and modernization of the existing drainage system a challenge, as these methods do not meet the aspirations of sustainable urban development. To efficiently manage urban stormwater and make urbanization safer and more sustainable, flood control is essential. However, it is necessary to understand the local hydrological cycle properties and

assess the impact of applying drainage techniques. In light of this, this study analyzed the hydrological behavior of the PE11 sub-basin and the consequent impact of implementing micro-reservoirs to treat the roof area, which represents 23.45% of the impermeable area and 34.28% of the total sub-basin area. For simulations with return periods of 5 years and 10 years, the results showed reductions in peak flow of up to 16.43% and 14.59%, respectively. Meanwhile, the runoff volume at the sub-basin outlet was reduced by up to 2.67% and 2.31%, respectively.

**KEYWORDS:** Micro reservoirs, SWMM, Urban Drainage, Sustainable.

## 1 | INTRODUÇÃO

O crescimento desordenado da população em áreas urbanas e a contínua expansão da urbanização têm causado impactos ambientais significativos, especialmente no que diz respeito à impermeabilização do solo e ao aumento do escoamento de águas pluviais. Esses fatores sobrecarregam os sistemas de drenagem, elevam o risco de inundações e prejudicam tanto o nível de água subterrânea quanto sua qualidade (Wang, Peng et al., 2020).

Diante disso, a gestão eficaz do escoamento pluvial torna-se essencial para mitigar esses problemas, principalmente em um cenário de mudanças climáticas e eventos de precipitação extremos (Larsen, Tove et al., 2016). O desafio se intensifica com o aumento da impermeabilidade das superfícies urbanas, que, associado às alterações climáticas, evidencia a insuficiência dos métodos tradicionais de drenagem para atender às necessidades de um desenvolvimento urbano sustentável (Gu, Xianyong et al., 2017; Mitchell, 2006).

Para tornar a urbanização mais segura e ambientalmente responsável, é crucial incluir o controle de inundações na gestão das águas pluviais. Isso pode ser feito tanto por meio de medidas estruturais, que envolvem modificações físicas como a construção de reservatórios e canais, quanto por estratégias não estruturais, focadas na prevenção de danos sem alterar o ambiente físico (Baptista et al., 2005; Tucci, 2007).

De acordo com Tucci (2003), a política predominante no gerenciamento da drenagem urbana é baseada na rápida eliminação da água pluvial por meio de sistemas de galerias subterrâneas, que coletam e direcionam o escoamento até o ponto de descarga. No entanto, o crescimento urbano contínuo torna esses sistemas obsoletos, exigindo constante ampliação e modernização para lidar com o escoamento excessivo e evitar alagamentos. O gerenciamento sustentável das águas pluviais, por outro lado, consiste em intervenções em diferentes escalas: na fonte, na micro e na macrodrenagem. Medidas na fonte incluem a detenção de lotes (reservatórios pequenos que controlam o fluxo máximo), pavimentos permeáveis e áreas de infiltração que recuperam a capacidade de absorção da água. As intervenções em micro e macrodrenagem, como detenções e retenções, envolvem a criação de reservatórios que podem ser integrados à paisagem urbana ou utilizados para

controle da vazão e qualidade da água (Tucci, 2003).

Diante da necessidade crescente de soluções sustentáveis para a drenagem urbana, o conceito de tecnologias de Desenvolvimento de Baixo Impacto (LID - Low Impact Development) surgiu como uma resposta eficiente. Essas tecnologias têm como objetivo imitar o comportamento hidrológico natural, minimizando os impactos das superfícies impermeáveis e melhorando a gestão do escoamento pluvial em áreas urbanas (Souza; Cruz; Tucci, 2012). Ao aproximar a drenagem urbana das funções ecossistêmicas naturais, essas técnicas não apenas melhoram a qualidade ambiental, mas também reduzem os impactos a jusante, contribuindo para uma urbanização mais sustentável.

Neste contexto, o presente estudo busca contribuir para a avaliação da eficiência dessas técnicas sustentáveis de controle de escoamento em áreas urbanas vulneráveis. O objetivo geral deste trabalho é realizar modelagens hidrológicas na microdrenagem da sub-bacia PE 11, localizada em Teresina - PI, a fim de avaliar a eficiência de técnicas compensatórias no controle das inundações. Especificamente, pretende-se realizar simulações que estimem as vazões geradas durante eventos chuvosos extremos, além de aplicar e simular o impacto de técnicas compensatórias utilizando o modelo hidrológico Storm Water Management Model (SWMM). Essas simulações permitirão entender melhor como tais técnicas podem mitigar os efeitos das enchentes e proporcionar uma gestão mais eficaz das águas pluviais urbanas.

## 2 | METODOLOGIA

### Área de estudo

A sub-bacia PE11 está inserida, segundo o Plano de Ordenamento Territorial (TERESINA, 2019), totalmente dentro dos limites do perímetro urbano, a área compreende uma região de gradiente topográfico bastante suave, com cotas que variam dos 102 m, junto à cabeceira, aos 54 m, na foz, sendo assim, propícia a alagamentos devido à ausência de sistemas de drenagem adequados às necessidades de escoamento das vazões geradas. A sub-bacia apresenta a forma de um leque, com área de 255,88 ha, perímetro de 6.902,74 m e coeficiente de compacidade de 1,21. No cruzamento das informações de uso e tipo de solo, o parâmetro CN médio para a sub-bacia foi estimado em 87,2. A Figura 1 mostra a sub-bacia PE11, demarcada em preto.

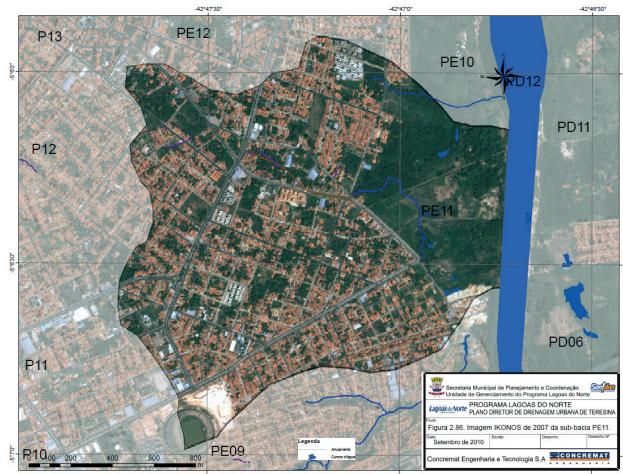


Figura 1: Sub bacia PE11.

Fonte: Teresina, 2010.

De posse dessas características, o modelo no SWMM foi dimensionado e submetido a eventos de chuva com Tempos de Retorno (TR) de 5 e 10 anos. Os parâmetros de entrada na sub-bacia PE11 estão descritos na Tabela 1. A área de intervenção com as LID's considerada foi referente a área da sub-bacia coberta por telhados, equivalente a 60,0 ha, cerca de 23,45% da área total da bacia e 34,28% da área impermeável total. A quantificação dessa área ocorreu por meio do uso dos programas computacionais Google Earth e Autodesk AutoCad.

Propriedade	Valor
Área (ha)	255,88
Largura (m)	4082,05
Declividade (%)	7,55
% Área impermeável	75
n Maning – Impermeável	0,01
n Maning – Permeável	0,1
Alt. de armaz. em depressões - Impermeável	1,5
Alt. de armaz. em depressões – Permeável	3,0
% de área impermeável sem armazenamento	25
CN	87,2

Tabela 1: Dados de entrada no SWMM da Sub bacia PE11.

Fonte: Autores (2024)

## Dados de precipitação:

Os eventos de chuva foram simulados utilizando a equação genérica das curvas de Intensidade-Duração-Frequência (IDF) de Teresina (Equação 1), conforme estabelecido no Plano Diretor de Drenagem Urbana (TERESINA, 2010). A partir dessa equação, foram definidos os hietogramas (Vide Figuras 2 e 3) de entrada para o modelo chuva-vazão, considerando tempos de retorno (TR) de 5 e 10 anos, com duração de 60 minutos e intervalo de 2 minutos para a análise do escoamento, conforme apresentado na Equação 1.

$$i = \frac{1194,237 \times T^{0,1738}}{(t+10)^{0,7457}} \quad \text{equação (1)}$$

Sendo  $i$  a intensidade da chuva em mm/h,  $T$  o período de retorno em anos e  $t$  o tempo de concentração da bacia em min.

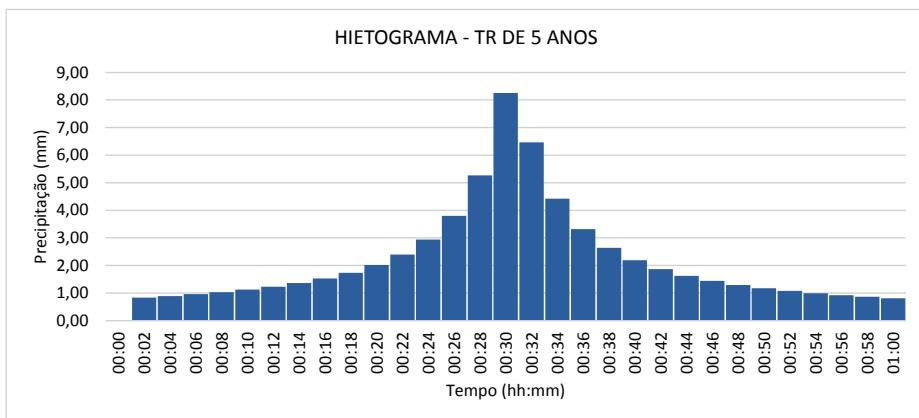


Figura 2: Hietogramas para TR de 5 anos.

Fonte: Autores (2024)

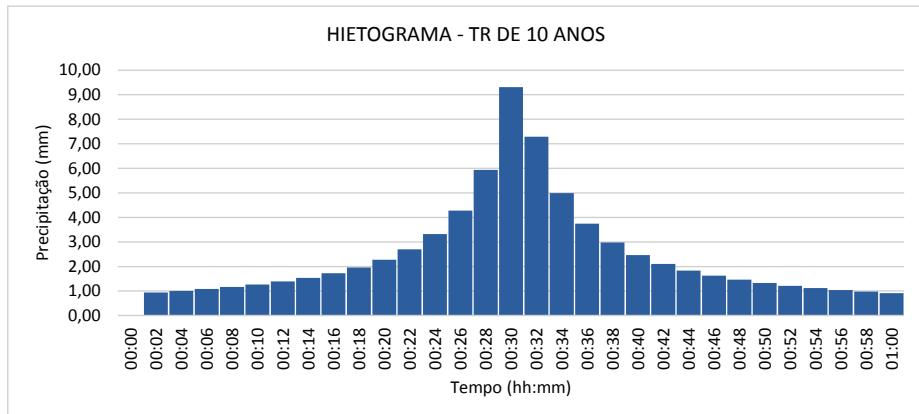


Figura 3: Hietogramas para TR de 5 anos.

Fonte: Autores (2024)

## Hidrogramas e Volume Escoado:

Para a análise do escoamento superficial e do volume escoado na saída da sub-bacia, utilizando o método da Onda Cinemática, foram gerados hidrogramas e calculado o volume de escoamento superficial para o cenário de Diagnóstico, considerando os tempos de retorno (TR) de 5 e 10 anos. Posteriormente, esses parâmetros foram analisados com a implementação das técnicas de Desenvolvimento de Baixo Impacto (LIDs), especificamente os micros reservatórios.

Parâmetro	Unidade	Valor
<b>Armazenamento</b>		
Altura da Camada de Armazenamento	mm	1000,00
Índices de vazio	-	-
Taxa de infiltração	mm/h	-
Fator de colmatação		
<b>Dreno</b>		
Coeficiente de Drenagem	-	1,00
Expoente de Drenagem	-	1,00
Altura da Tomada de Água	mm	1000,00

Tabela 2 - Parâmetros de controle de LID para micros reservatórios.

Fonte: Autores (2024)

A implantação efetiva dessa medida considerou um barril de chuva por lote, com uma área média de telhados de aproximadamente 200,00 m<sup>2</sup> e largura característica de 4,5 m. Para os edifícios comerciais, a área de telhados na sub-bacia determinou um total aproximado de 3.000 barris de chuva, levando em conta um cenário de intervenção em 100% da área de telhados, que corresponde a 34,28% da área impermeável total da sub-bacia. Com isso, foram dimensionados três grupos de LID's, cada um tratando 11,43% da área impermeável, contendo 1.000 barris de chuva em cada grupo. Os valores adotados para cada parâmetro da LID para a implementação na sub-bacia PE11 são detalhados na Tabela 3.

Parâmetro	Valor de entrada
Área de cada unidade (m <sup>2</sup> )	1
Número de unidades	1000
Largura da superfície por unidade	4,5
% da saturação inicial	0
% da área impermeável tratada	11,43
% da área permeável tratada	0

Tabela 3.- Dados de implementação dos micros reservatórios na Sub-bacia PE11.

Fonte: Autores (2024)

Para a análise do escoamento superficial e do volume escoado no exutório da sub-bacia, foi utilizado o método da Onda Cinemática, gerando-se hidrogramas que ilustram o comportamento do escoamento tanto no cenário diagnóstico quanto após a implementação das LID's. Essas simulações consideraram um cenário de intervenção em que a LID tratava 100% da área de telhados da sub-bacia.

Os micros reservatórios foram escolhidos como uma medida de desenvolvimento de baixo impacto (LID) devido ao seu custo-benefício favorável, além da facilidade de instalação. Essas unidades permitem o armazenamento temporário de água da chuva, o que reduz o pico de escoamento e diminui a pressão sobre o sistema de drenagem, contribuindo para mitigar o risco de alagamentos. O uso de micro reservatórios também promove uma gestão mais sustentável das águas pluviais, aproximando-se das condições naturais do ciclo hidrológico, ao mesmo tempo em que proporciona flexibilidade para diferentes tipos de áreas urbanas.

## 3 | RESULTADOS

### Cenário Diagnóstico:

Na modelagem do cenário de referência, sem a aplicação de técnicas compensatórias, o escoamento superficial começa já no primeiro minuto de simulação. Conforme ilustrado na Figura 4, para um TR de 5 anos, o pico da vazão atingiu 103.339,7 L/s, com um volume total escoado na saída da sub-bacia de 142.405.000,00 L. Já para o TR de 10 anos, o pico de vazão foi de 119.917,1 L/s, resultando em um volume total escoado de 163.367.000,00 L, como mostrado na Figura 5. Em ambos os casos, a vazão de pico ocorre 32 minutos após o início da precipitação.

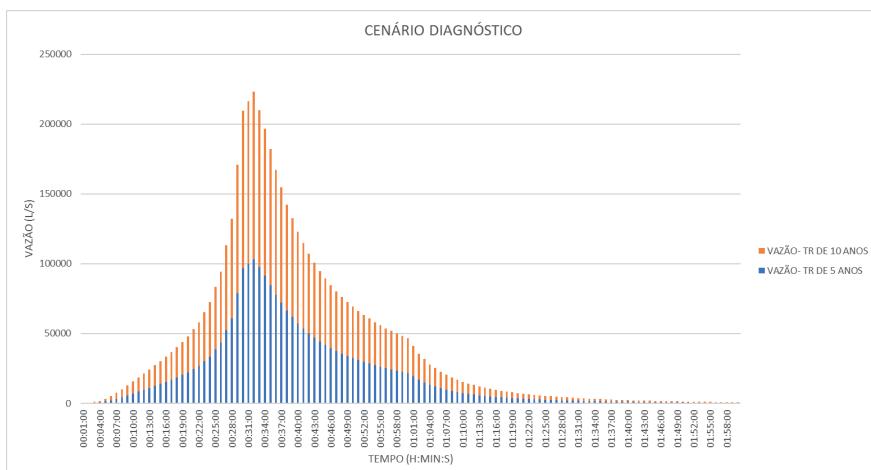


Figura 4: Hidrogramas do cenário diagnóstico para TR de 5 anos e TR de 10 anos.

Fonte: Autores (2024)

## Cenários de Intervenção com micro reservatórios em 100% da área de telhados:

Nos cenários em que 100% da área dos telhados é tratada com LID's, os resultados estão apresentados na Figura 5. Ao implementar micros reservatórios na sub-bacia PE11, sob uma precipitação com TR de 5 anos, o pico de vazão atingiu 86.352,63 L/s, e o volume total escoado na saída da sub-bacia foi de 138.595.000,00 L, o que representa uma redução de 2,67% em comparação com o cenário de referência. Para o TR de 10 anos, o pico de vazão foi de 102.411,70 L/s, com um volume escoado de 159.589.000 L, resultando em uma redução de 2,31% em relação à condição inicial.

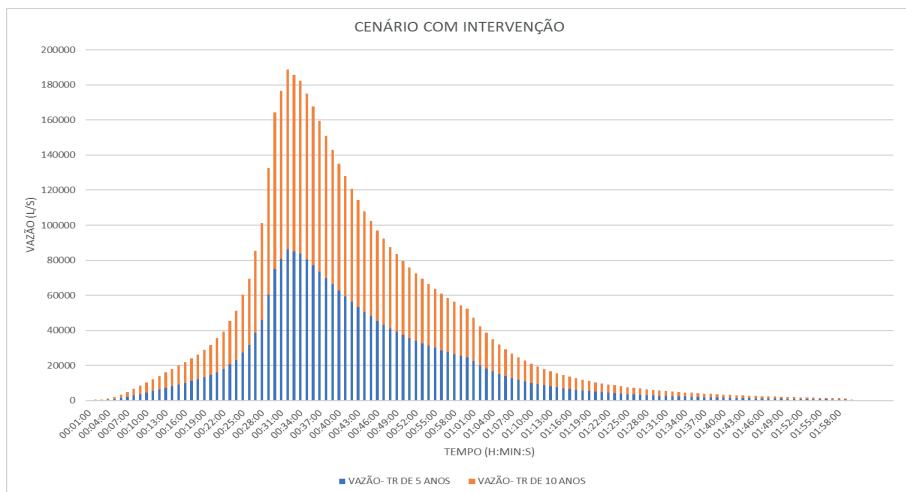


Figura 5: Hidrogramas do cenário com intervenção das LID's para TR de 5 anos e TR de 10 anos.

Fonte: Autores (2024)

## Panorama Geral:

Sob o TR de 5 anos, a LID apresentou um desempenho ligeiramente superior, como mostrado na Tabela 4. Isso se deve ao fato de que, embora o armazenamento dos barris de chuva seja o mesmo para ambos os cenários, no TR de 10 anos o volume de chuva é maior, o que resulta em mais água não retida na fonte e, consequentemente, em maior escoamento.

Cenário	Tempo de simulação até o pico (h:min:s)	Tempo de retorno (anos)	Pico de vazão (L/s)	Volume total escoado (L)	Redução do pico de vazão (%)	Redução do volume total (%)
Cenário diagnóstico	00:32:00	5	103.339,7	142.405.000,00	-	
Cenário diagnóstico	00:32:00	10	119.917,1	163.367.000,00	-	
Micro reservatórios em 100% da área de telhados	00:32:00	5	86.352,63	138.595.000,00	16,43	2,67
Micro reservatórios em 100% da área de telhados	00:32:00	10	102.411,70	138.595.000,00	14,59	2,31

Tabela 4: Comparação dos cenários de intervenção com o diagnóstico para TR de 5 anos e TR de 10 anos.

Fonte: Autores (2024)

Conforme Palla (2017), apesar do desempenho hidrológico dos micros reservatórios ser limitado em eventos de chuva intensa e curta duração, sua instalação em áreas urbanas ainda contribui significativamente para melhorar o desempenho da rede de drenagem, mesmo em tempestades de projeto com TR de 10 anos.

Outro aspecto importante é a cobertura da área impermeável que a LID consegue tratar. As simulações indicaram que, quanto mais próxima de 100% é a cobertura da área dos telhados pelos micros reservatórios, maiores são os atrasos e as reduções tanto da vazão de pico quanto do volume total escoado. Esses resultados estão alinhados com estudos como o de Versini et al. (2015), que analisaram o comportamento de telhados verdes em uma sub-bacia urbana de Trappes, França. Nessa pesquisa, verificou-se que, com o aumento da cobertura de áreas impermeáveis tratadas, de 12,5% a 100%, a eficiência das LIDs também aumentava.

Além disso, a integração de diferentes dispositivos de baixo impacto (LID) potencializa a mitigação de enchentes em bacias urbanas. Estudos de Liao et al. (2015) realizados em Xangai (China) confirmam que a diversificação das técnicas compensatórias em áreas urbanizadas oferece um bom custo-benefício, pois algumas soluções são mais acessíveis e fáceis de implementar, dependendo das condições locais.

Assim, os micros reservatórios se destacam como uma solução eficiente para controle na fonte, sendo fáceis de instalar e permitindo o reaproveitamento da água pluvial, o que diminui o uso de água potável. Além de limitar as vazões, esses dispositivos ajudam a evitar falhas no sistema de drenagem e a reduzir o volume de escoamento que precisa

ser tratado antes de ser liberado nos corpos d'água receptores (PALLA, 2017).

## 4 | CONCLUSÃO

Este trabalho avaliou, por meio de simulações, os impactos das Soluções de Desenvolvimento de Baixo Impacto sobre o escoamento superficial na Sub-Bacia PE11, aplicando-as para dois tempos de retorno de chuva: um de 5 anos e outro de 10 anos.

Os resultados obtidos mostraram que a aplicação dos micros reservatórios, utilizando o modelo EPA SWMM, levou a uma pequena redução no volume total escoado. Para o tempo de retorno de 5 anos, houve uma redução de 2,67%, enquanto para o tempo de retorno de 10 anos, a redução foi de 2,31%. Embora essas reduções sejam relativamente pequenas, o resultado era esperado, considerando que a capacidade de armazenamento dos micros reservatórios foi dimensionada para apenas 1 m<sup>3</sup>. A eficiência dessas LID's é fortemente influenciada por suas dimensões e propriedades.

É importante destacar que o desempenho das LID's diminui à medida que a intensidade das chuvas aumenta, sendo mais eficaz para chuvas com menores tempos de retorno. Além disso, para mitigar significativamente o volume de escoamento, os micros reservatórios, por si só, não são suficientes. Portanto, é essencial que outras técnicas LID's sejam integradas para se obter melhores resultados.

Dessa forma, o presente estudo recomenda o uso de micro reservatórios, mas ressalta que, sozinhos, eles não constituem uma solução completa para os problemas de drenagem. É necessário adotar um conjunto de soluções adaptadas às condições específicas de cada local, além de fomentar discussões sobre novos métodos de controle de alagamentos urbanos.

## REFERÊNCIAS

- BAPTISTA, M., Nascimento, N., Barraud, S. (2005). **Técnicas Compensatórias em Drenagem Urbana.** Primeira Edição. Associação Brasileira de Recursos Hídricos - ABRH. Porto Alegre, RS. Brasil. 266 pp.
- BARCO, J.; WONG, K.M.; STENSTROM, M.K. **Automatic Calibration of the U.S. EPA SWMM Model for a Large Urban Catchment.** *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 134, n. 4, p. 466-474, 2008. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2008\)134:4\(466\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:4(466))
- P. Wang, X. Wu, Y. Hao, C. Wu, J. Zhang, Is Southwest China drying or wetting? Spatiotemporal patterns and potential causes, *Theor. Appl. Climatol.* (2019) 1–15.
- Rossman L.A. (2010). **Storm Water Management Model User's Manual Version 5.0.** EPA/600/R-05/040, US EPA National Risk Management Research Laboratory. Cincinnati, Ohio, USA.
- SOUZA, C.F.; CRUZ, M.A.S.; TUCCI, C.E.M. **Desenvolvimento Urbano de Baixo Impacto: Planejamento e Tecnologias Verdes para a Sustentabilidade das Águas Urbanas.** RBRH: Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 17, n.2 p. 9 18, abr/jun 2012.

T.A. Larsen, S. Hoffmann, C. Lüthi, B. Truffer, M. Maurer, Emerging solutions to the water challenges of an urbanizing world, *Science* 352 (2016).

TERESINA. Secretaria Municipal de Planejamento e Coordenação Geral. (2010). **Plano Diretor de Drenagem Urbana de Teresina**. Teresina, Piauí, Brasil.

Tucci, C.E.M. (2003). “**Drenagem urbana**”. *Cienc. Cult*, Vol. 55 No. 4, 2003.

Tucci, C. E. M. (2007). **Inundações Urbanas**. Primeira Edição. Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH). RHAMA. Porto Alegre, RS. Brasil. 393 pp.

V.G. Mitchell, **Applying integrated urban water management concepts: a review of Australian experience**, *Environ. Manag.* 37 (2006) 589–605.