

# Efeito da discretização espacial da sub-bacia nos resultados do modelo hidrológico chuva-vazão

*Effect of hydrographic sub-basin spatial discretization on the results of the rainfall-runoff hydrological model*

- **Data de entrada:**  
23/02/2022
- **Data de aprovação:**  
18/07/2022

José Paulo da Silveira Neto<sup>1\*</sup> | Marco Aurélio Holanda de Castro<sup>1</sup> | Cristiane Barbosa Monteiro<sup>2</sup> | Carlos Ernando da Silva<sup>2</sup> | Alessandro de Araújo Bezerra<sup>2</sup> | DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2023.040>

## ORCID ID

Silveira Neto JP  <https://orcid.org/0000-0002-4392-4102>

Castro MAH  <https://orcid.org/0000-0001-5134-7213>

Monteiro CB  <https://orcid.org/0000-0002-6496-5210>

Silva CE  <https://orcid.org/0000-0001-5653-0359>

Bezerra AA  <https://orcid.org/0000-0002-9243-0731>

## Resumo

Há uma escassez notável de estudos que avaliem a influência da discretização espacial da bacia hidrográfica sobre a performance do modelo hidrológico do NRCS. Nesse contexto, este trabalho objetiva determinar a influência da discretização em microbacias sobre o cálculo das vazões máximas, pelo modelo chuva-vazão do NRCS, e sobre o volume máximo de um reservatório de retenção, por meio de um estudo aplicado a uma sub-bacia localizada em Teresina-PI. Cinco cenários de discretização foram analisados, dividindo a sub-bacia em 2, 4, 8, 15 e 32 microbacias. A propagação dos hidrogramas foi realizada por meio do modelo da onda dinâmica no SWMM. Os hidrogramas resultantes, as vazões máximas e os volumes máximos do reservatório de retenção para cada nível de discretização foram comparados. As simulações com o maior grau de discretização resultaram nos menores picos de vazão e nos menores volumes máximos. Essa relação, no entanto, não foi contínua e foi influenciada por outros parâmetros.

**Palavras-chave:** NRCS. SWMM. Discretização Espacial. Hidrogramas. Reservatório de Detenção.

## Abstract

*There is a notable lack of studies that evaluate the influence of watershed spatial discretization on the performance of the NRCS hydrological model. In this context, this work aims to determine how watershed discretization influences the calculation of maximum discharge, using the NRCS rainfall-runoff model, and detention reservoir maximum volume on a hydrographic sub-basin located in Teresina, Piauí, Brazil. Five spatial discretization scenarios were analyzed, dividing the studied watershed into 2, 4, 8, 15, and 32 smaller ones. Hydrograph propagation was performed using the dynamic wave model in SWMM. The resulting hydrographs, maximum discharge and detention pond maximum volume for each discretization scenario were compared. The simulations with the highest degree of discretization resulted in the lowest peak discharge and the lowest maximum volumes. This relationship, however, was not continuous and was influenced by other parameters.*

**Keywords:** NRCS. SWMM. Spatial discretization. Hydrographs. Detention reservoir.

<sup>1</sup> Universidade Federal do Ceará, Campus Pici, Fortaleza - Ceará - Brasil.

<sup>2</sup> Universidade Federal do Piauí, Teresina - Piauí - Brasil.

\* **Autor correspondente:** [js\\_silveirant@hotmail.com](mailto:js_silveirant@hotmail.com).

## 1 INTRODUÇÃO

Em bacias hidrográficas de grandes dimensões ou bastante heterogêneas, a variabilidade espacial das características físicas da bacia, como tipo de solo, cobertura vegetal e relevo, torna necessária a adoção de modelos hidrológicos distribuídos, que discretizam as bacias hidrográficas em unidades menores, podendo ser células regulares ou sub-bacias (PONTES et al., 2015). Conforme estudo comparativo de Paz et al. (2011), a discretização em sub-bacias representa melhor a hidrografia das bacias.

O modelo chuva-vazão do Natural Resources Conservation Service (NRCS) é muito utilizado para a estimativa do escoamento superficial de bacias hidrográficas (BAIAMONTE, 2019; SANZ-RAMOS et al., 2020). Esse modelo foi originalmente concebido como um modelo concentrado (MAIDMENT et al., 1996); no entanto, a crescente disponibilidade de bases de dados espaciais, o aumento da capacidade computacional e o desenvolvimento de ferramentas com tecnologia de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) possibilitaram o desenvolvimento de abordagens distribuídas do modelo do NRCS (JENA et al., 2012).

Os modelos hidrológicos distribuídos são bastante sensíveis à resolução espacial dos parâmetros de entrada. O comportamento de um modelo desse tipo varia de acordo com a escala do sistema, e o nível de discretização em sub-bacias apresenta grande influência sobre sua performance (JHA et al., 2004; DUTTA; NAKAYAMA, 2009).

Zanandrea e Silveira (2018) descreveram que quanto maior o nível de discretização, mais precisos serão os resultados dos modelos hidrológicos. Jha et al. (2004), no entanto, observaram que a discretização em sub-bacias pouco interferiu nos resultados de vazões obtidos para as bacias analisadas em seu trabalho. Já Costa (2002) constatou que uma discretização espacial mediana foi a mais adequada para a modelagem da bacia do

Rio Corumbá. Ademais, estudos realizados com diferentes modelos hidrológicos apontam comportamentos diferentes quanto aos picos de vazão dos hidrogramas, o que leva a crer que cada modelo deve ser analisado isoladamente (GARCIA et al., 2004; GARCIA; PAIVA, 2006; MAHUNGUANA; BRAVO, 2015). Diante dessas especificidades, a escassez de estudos que tratam da influência da discretização espacial da bacia hidrográfica sobre o modelo chuva-vazão do NRCS sugere a necessidade de um estudo direcionado, para contribuir com a discussão.

O objetivo deste trabalho foi determinar a influência da discretização espacial de uma sub-bacia hidrográfica do Município de Teresina - PI em microbacias, sobre o cálculo das vazões máximas pelo modelo chuva-vazão do NRCS, por meio de análise comparativa dos hidrogramas afluentes a um reservatório de retenção; e, conseqüentemente, na determinação do máximo volume de armazenamento do reservatório.

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

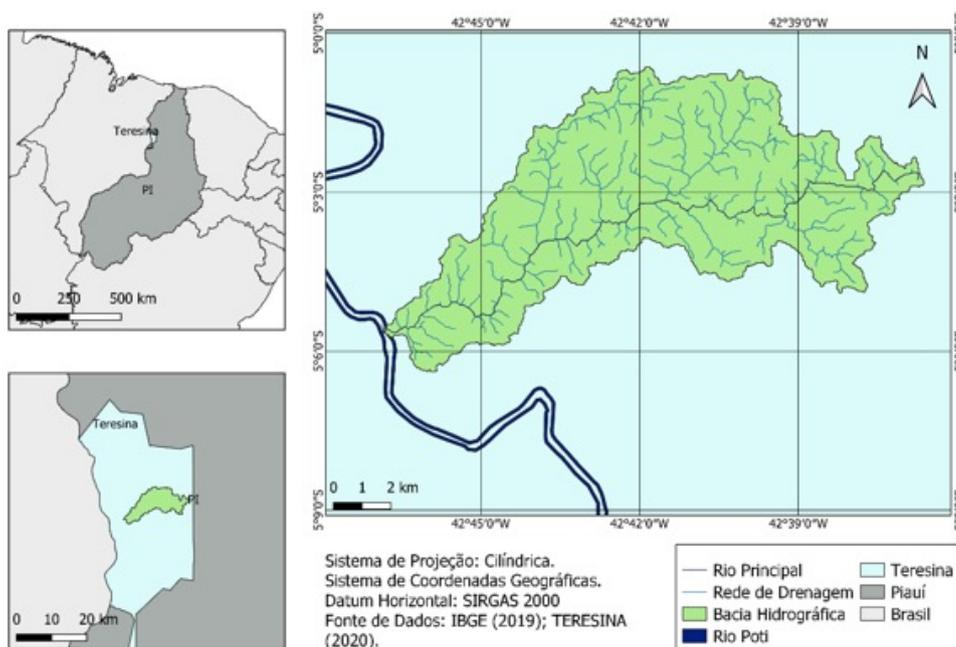
### 2.1 Área de Estudo

Devido à disponibilidade de dados e à adequação à metodologia da pesquisa, a área de estudo selecionada correspondeu a uma sub-bacia hidrográfica do Município de Teresina, Piauí. O município situa-se na Região Hidrográfica e planície sedimentar do Rio Parnaíba, onde as elevações são inferiores a 180 m de altitude e as declividades inferiores a 15% (TERESINA, 2012a; TERESINA, 2017).

A precipitação em Teresina é desigual ao longo do ano, concentrando cerca de 75,6% do total anual entre os meses de janeiro a abril, sendo o mês de março o mais chuvoso, com altura média precipitada de 321mm (TERESINA, 2017).

O território urbano de Teresina é marcado pela presença do Rio Parnaíba e de seu principal afluente, o Rio Poti. O relevo e a hidrografia de Teresina determinam três macrobacias de escoamento, uma delas de contribuição direta ao Rio Parnaíba e outras duas de contribuição direta ao Rio Poti, uma na margem direita e outra na esquerda (TERESINA, 2012a). As macrobacias foram divididas em 70 sub-bacias: 22 na macrobacia do Rio Parnaíba (P), 16 na macrobacia da margem direita do Rio Poti (PD), e 32 na margem esquerda do Rio Poti (PE) (TERESINA, 2017).

Para este trabalho foi selecionada a sub-bacia de maior área dentre as 70 sub-bacias do Município de Teresina. A sub-bacia PD11 (Fig. 1) está localizada na margem direita do Rio Poti, e será tratada como a sub-bacia hidrográfica em estudo a partir de então. A área da sub-bacia é de 88,86km<sup>2</sup>, o curso d'água principal possui comprimento de 26,77km e desnível total de 144,69m. O tempo de concentração é de 559,25min. A sub-bacia hidrográfica é essencialmente rural e possui um CN médio no valor de 77,4 (TERESINA, 2012b).



**Figura 1** - Mapa de localização da sub-bacia hidrográfica estudada, localizada no Município de Teresina - PI, incluindo rede de drenagem.

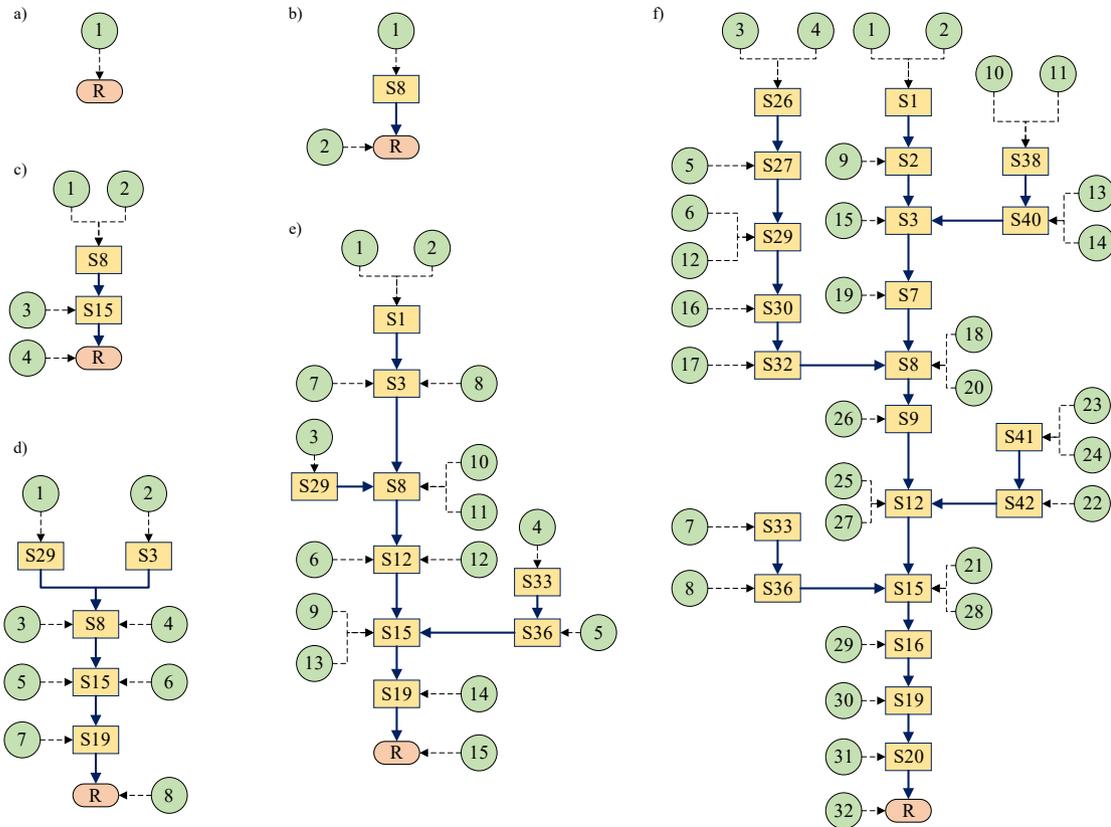
## 2.2 Discretização Espacial da Sub-bacia Hidrográfica e suas Características Físicas

Foram analisados 5 níveis de discretização espacial, considerando 2, 4, 8, 15 e 32 microbacias, conforme Fig. 2, adotando como critérios de divisão as confluências da rede de drenagem (PAZ et al., 2011). As microbacias e a hidrografia foram delimitadas utilizando o software QGIS (PEREIRA et al., 2021), a partir de um conjunto

de scripts personalizados desenvolvidos em linguagem Python. O QGIS é um software gratuito e de código aberto, o que permite uma grande flexibilidade na utilização de linguagens de programação e customização de tarefas. Os scripts desenvolvidos automatizam e integram, em poucos comandos, todos os passos necessários para a delimitação de bacias hidrográficas, incluindo rede de drenagem.

Como dados de entrada para a delimitação das microbacias foram utilizados o modelo digital de elevação (DEM) da missão STRM, disponibilizado pela iniciativa TOPODATA com resolução horizontal de 30m, e vertical de 1m; e as coordenadas dos exutórios de cada microbacia, que

foram previamente definidas mediante análise de imagens de satélite e da rede de drenagem. A partir do modelo digital de elevação, também foram geradas curvas de nível com resolução de 1m, utilizando as ferramentas do QGIS.



**Figura 2** - Fluxograma do escoamento da sub-bacia (a) discretizada em 2 microbacias (b); 4 microbacias (c); 8 microbacias (d); 15 microbacias (e); e 32 microbacias (f).

Para cada nível de discretização espacial, as microbacias delimitadas, com seus respectivos cursos d'água principais, foram exportados para o software AutoCAD 2019. O processo de entrada de dados para o modelo chuva-vazão foi automatizado com o uso das ferramentas do AutoCAD, assim como o traçado de rios (canais) para propagação da vazão escoada pelas microbacias até o reservatório de detenção, além da própria inserção do reservatório e o estaqueamento de seções transversais ao longo do comprimento dos rios.

As seções transversais determinaram a geometria dos rios mediante cálculo das cotas topográficas por interpolação linear das curvas de nível em uma série de pontos ao longo da largura da seção. Conforme fluxograma da Fig. 2, as seções transversais (retângulos amarelos) serviram como receptores da vazão lateral gerada nas microbacias (círculos verdes) e da vazão escoada pelos canais (setas azuis). O fluxo entre as microbacias ocorreu através dos canais gerados a partir do traçado do

rio. Uma microbacia não contribuiu diretamente para outra.

Para a sub-bacia hidrográfica (Fig. 2.a), foi traçado um rio de 18,85km de extensão e definidas 25 seções transversais de 1km de largura e número de Manning de 0,045m-1/3.s (PORTO, 2006), com geometria irregular, representando as margens e o fundo do rio. Foi inserido um reservatório de retenção na penúltima seção, correspondente ao exutório da sub-bacia. Esse rio foi mantido para os níveis de discretização seguintes, conforme Fig. 2.b e Fig. 2.c.

Para discretização espacial em oito microbacias (Fig. 2.d), foi traçado um afluente ao primeiro rio, com comprimento de 3,19km e 7 seções transversais, com as mesmas configurações das seções anteriores. Para a discretização em 15 microbacias (Fig. 2.e), foi inserido um novo afluente, com comprimento de 5,87km e 5 seções transversais. Para a discretização em 32 microbacias (Fig. 2.f), houve a necessidade do traçado de dois novos afluentes, o primeiro com 0,93km e três seções transversais; e o segundo com 1,19km e duas seções transversais. A extremidade de jusante de todos os afluentes é uma seção transversal do primeiro rio, que recebeu a vazão propagada por cada afluente.

### 2.3 Modelagem Hidrológica

O tempo de concentração da sub-bacia e de cada microbacia foi calculado através das equações de Kirpich modificadas, conforme Eq. 1 e 2 (BRASIL, 2005).

$$t_c = 57 \left( \frac{L^3}{\Delta H} \right)^{0,385}, \text{ para } A < 1 \text{ km}^2 \quad (1)$$

$$t_c = 85,2 \left( \frac{L^3}{\Delta H} \right)^{0,385}, \text{ para } A > 1 \text{ km}^2 \quad (2)$$

Onde  $t_c$  é o tempo de concentração (min),  $A$  é a área da bacia ( $\text{km}^2$ ),  $L$  é o comprimento do talvegue (km) e  $\Delta H$  é a diferença de cotas entre as extremidades do talvegue da bacia (m). Os valores desses parâmetros foram calculados de forma automática a partir de rotinas computacionais.

A duração de chuva de 60 minutos foi adotada pela Prefeitura de Teresina para determinação das máximas vazões permissíveis. A análise da série histórica de precipitações diárias do município aponta que a duração de chuva de 60 minutos é suficiente para proteção contra a maior parte das precipitações ocorridas na cidade (MONTEIRO, 2021). No entanto, a literatura recomenda a adoção de uma duração de precipitação igual ou superior ao tempo de concentração da sub-bacia hidrográfica, que é de 559,25min, calculado pela Eq. 2 (MAHUNGUANA; BRAVO, 2015). Optou-se por utilizar uma duração de 720min por ser superior ao tempo de concentração de todas as microbacias do projeto, nos diferentes níveis de discretização espacial. Dessa maneira, foram analisadas duas chuvas de projeto, de 60min e de 720min, uniformes em toda a área da sub-bacia, para estabelecer uma comparação entre os resultados da modelagem. Ressalta-se que, devido à uniformidade da chuva sobre toda a sub-bacia, os resultados obtidos são bastante conservadores, mas cumprem o objetivo deste trabalho de analisar o efeito da discretização espacial.

As intensidades e precipitações totais das chuvas de 60min e 720min foram calculadas pela equação IDF de Teresina (Eq. 3) (TERESINA, 2012b), onde  $I$  é a intensidade (mm/h);  $TR$  é o tempo de retorno (anos); e  $t$  é a duração da precipitação (min).

$$I = \frac{1.194,273 \cdot TR^{0,1738}}{(t + 10)^{0,7456}} \quad (3)$$

O período de retorno adotado foi de 10 anos, o mesmo utilizado para elaboração da atual legislação do município. A precipitação total da chu-

va de 60 minutos foi de 75mm e a intensidade média, 75mm/h. A chuva de 720 minutos teve uma precipitação total de 156,96mm e uma intensidade média de 13,08mm/h. Os hietogramas de projeto foram calculados pelo método de Huff 1º quartil, por ser aquele que melhor descreve a precipitação de Teresina (ROCHA et al., 2016).

Os hidrogramas das microbacias foram calculados por meio do modelo chuva-vazão do NRCS, recomendado para bacias hidrográficas com área superior a 2km<sup>2</sup>, cuja precipitação efetiva é determinada a partir do CN da bacia; e a distribuição temporal do volume precipitado é determinada pelo método do hidrograma unitário sintético (NRCS, 2004; BAIAMONTE, 2019).

O método NRCS é um dos mais populares no cálculo do escoamento superficial direto. Sua popularidade é decorrente de sua simplicidade, estabilidade, facilidade de aplicação e por considerar a maioria das características da bacia hidrográfica, como tipo de solo, uso da terra, condições hidrológicas e umidade antecedente (MISHRA; PANDEY; SINGH, 2012).

Para cada nível de discretização, foram determinados os valores do CN médio de cada microbacia por meio da análise de imagens de satélite via QGIS. As microbacias foram então submetidas à variação uniforme do CN, em um intervalo de 70 a 90, com incrementos de 2,5, a fim de verificar a influência do uso e ocupação do solo na análise dos efeitos da discretização espacial da sub-bacia hidrográfica sobre os resultados da modelagem hidráulico-hidrológica. Para cada microbacia foram calculados, a partir de implementação computacional, 20 hidrogramas de projeto, 10 para cada duração de chuva de projeto.

## 2.4 Reservatório de Detenção

Existem diferentes modelos para estimativa do volume de armazenamento dos reservatórios de

detenção. Assunção (2012) explica que o volume de um reservatório de detenção pode ser calculado por meio de metodologias hidrológicas, baseadas em modelos chuva-vazão; ou de metodologias hidráulico-hidrológicas, considerando as condições de controle das estruturas de saída.

O reservatório de detenção implementado neste trabalho consistiu em um barramento constituído por um vertedor de concreto de 10m de altura, e por uma tomada d'água de 600mm (PORTO, 2003), determinando uma bacia hidráulica a montante.

A rotina computacional desenvolvida mapeou, em ambas as margens do rio, ao longo da seção transversal, os pontos cujas cotas correspondessem ao valor da cota de fundo do vertedor acrescido de sua altura, determinando o comprimento da barragem de 1.765,82m. Para fins de controle dos resultados, foi definido que a descarga dos reservatórios ocorreria apenas pela tomada d'água, cujo coeficiente de descarga foi no valor de 0,75. Dessa maneira, não houve escoamento através do vertedor.

O volume de armazenamento do reservatório foi definido pela curva profundidade x área, que associa a profundidade da água no reservatório com a área superficial ocupada pelo lago do reservatório nessa profundidade. Para o cálculo das áreas superficiais que compõem a curva profundidade x área, o programa desenvolvido seguiu o traçado do rio de jusante para montante, a partir da seção na qual o barramento foi inserido e, para cada seção a montante, foram determinados os pontos em ambas as margens que possuíam cota topográfica igual ao nível d'água no reservatório, para diferentes valores de profundidade da lâmina d'água ao longo da altura do vertedor. O valor de cada área superficial foi determinado a partir do polígono definido pela união dos pontos ao longo do traçado do rio, para cada valor de profundidade.

## 2.5 Propagação da Vazão

A modelagem hidráulica de propagação de vazão das microbacias foi realizada por meio do modelo computacional Storm Water Management Model - SWMM 5.1, pelo método da onda dinâmica (SILVA; SILVA JÚNIOR; OLIVEIRA, 2020). A propagação do fluxo do escoamento superficial é regida pelas equações de Saint Venant de conservação de massa e de conservação de momento.

Foi desenvolvida uma interface entre AutoCAD e SWMM que permitiu a transferência automática do projeto configurado no AutoCAD para o SWMM. Para cada nível de discretização foram realizadas 20 simulações hidráulicas, 10 para cada duração de chuva de projeto (1 simulação com os valores de CN médio de todas as microbacias, e outras 9 simulações com variação do CN de 70 a 90).

No SWMM os trechos dos rios foram representados por condutos de seção irregular e as seções por nós de conexão. A última seção do rio foi considerada um nó exutório, que define a condição de jusante do sistema. O reservatório de retenção foi representado por uma unidade de armazenamento. As propriedades volumétricas do reservatório foram determinadas pelas curvas profundidade x área. Cada nó correspondente ao exutório de uma microbacia recebeu o hidrograma de projeto da respectiva microbacia, que em seguida foi propagado até a unidade de armazenamento.

A tomada d'água foi representada por um bocal e fez a ligação entre a unidade de armazenamento e o nó imediatamente a jusante, para o qual a descarga do reservatório foi direcionada.

Durante a simulação no SWMM, a unidade de armazenamento foi preenchida conforme definição da curva profundidade x área, e simultaneamente a vazão foi descarregada para jusante através do bocal. O volume máximo definido pelo SWMM representa a maior quantidade de água armazenada durante a simulação, determinada pela diferença entre a vazão de entrada e a de saída da unidade de armazenamento.

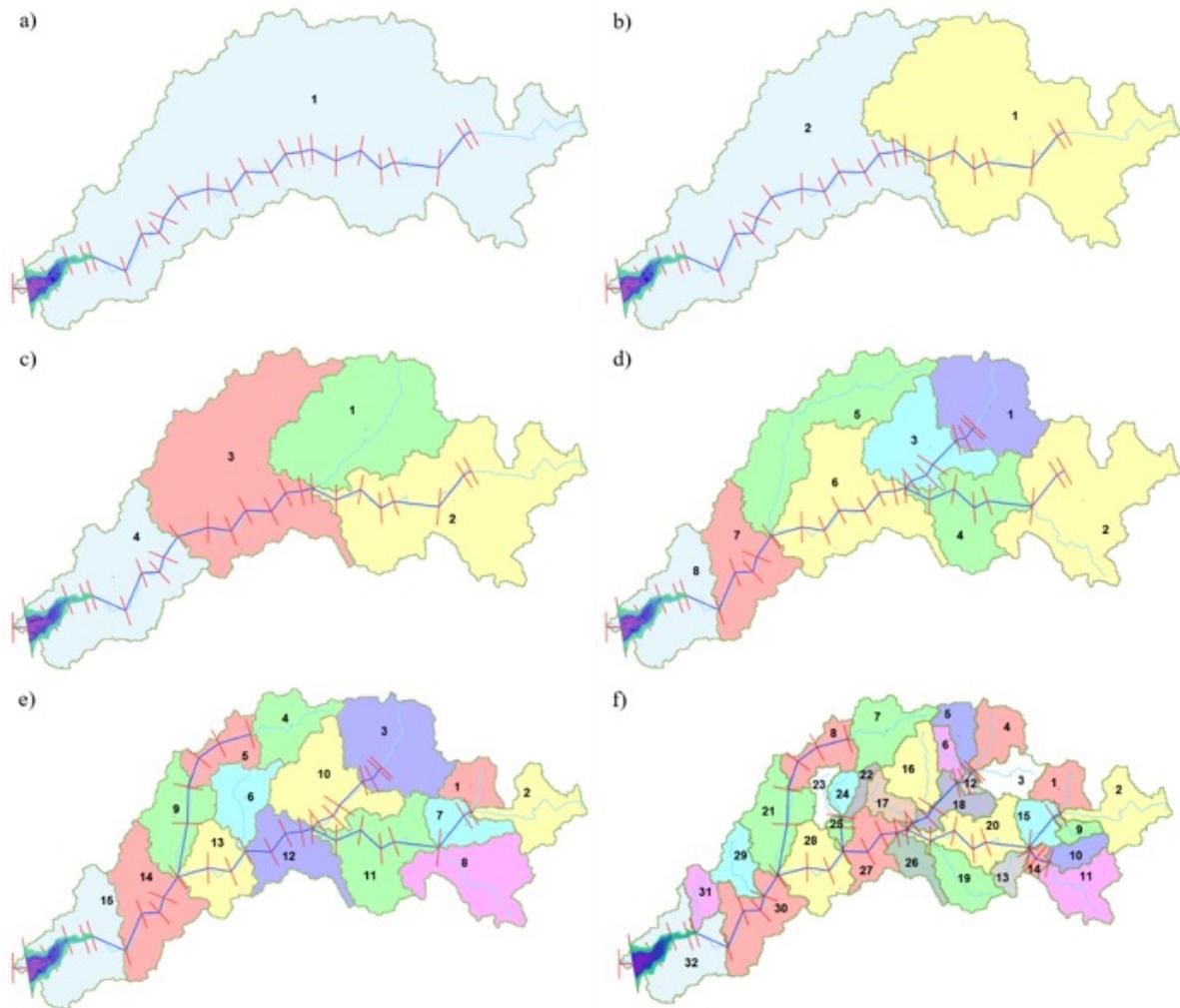
## 3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 3.1 Vazão Máxima do Hidrograma Afluentes do Reservatório de Detenção

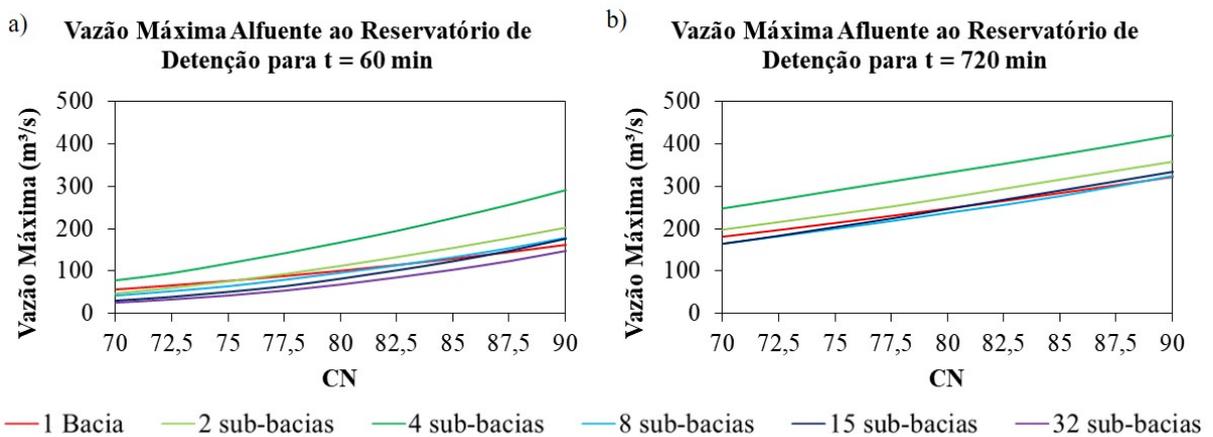
Na Fig. 3 são apresentados os projetos dos sistemas de drenagem desenvolvidos no AutoCAD, para a sub-bacia e para os 5 níveis de discretização trabalhados, tal qual foram definidos no fluxograma da Fig. 2.

As linhas em azul escuro representam os rios (ou canais) e afluentes. Enquanto na Fig. 3.a foi traçado apenas um rio, na Fig. 3.f, além desse rio, foram traçados mais 4 afluentes. As retas em vermelho simbolizam as seções transversais dos rios, que delimitam os trechos. Na penúltima seção (S24) do rio definido como principal, está localizado o reservatório de retenção, definido por um conjunto de polígonos de diferentes cores que representam a bacia hidráulica do reservatório em condição de armazenamento máximo.

Na Fig. 4 é apresentado, para cada duração de chuva, um gráfico contrapondo as vazões máximas afluentes ao reservatório de retenção, em função da variação do CN, para cada nível de discretização espacial da sub-bacia hidrográfica.



**Figura 3** - Ilustração da sub-bacia (a) discretizada em 2 microbacias (b); 4 microbacias (c); 8 microbacias (d); 15 microbacias (e); e 32 microbacias (f). Incluindo representação do rio e afluentes para a propagação da vazão, assim como do reservatório de detenção.



**Figura 4** - Gráficos comparativos entre as vazões máximas afluentes ao reservatório de detenção, em função do CN das microbacias, para cada nível de discretização espacial da sub-bacia hidrográfica, considerando chuva de 60min (a); e chuva de 720min (b).

A partir da discretização da sub-bacia em duas microbacias, o reservatório de detenção recebeu inicialmente a vazão escoada pela microbacia localizada mais a jusante do sistema (como a microbacia 2 na Fig. 3.b) e, em seguida, a vazão propagada ao longo do rio, resultante do escoamento das microbacias a montante.

Na Tabela 1 é apresentada, para as chuvas de 60 minutos e de 720 minutos, a variação da vazão máxima afluente ao reservatório de detenção entre os níveis de discretização espacial da sub-bacia hidrográfica, para os valores de CN analisados, tomando como referência os resultados da simulação da sub-bacia sem discretização.

A discretização da sub-bacia em 4 microbacias foi a configuração que resultou nos maiores valores de vazões máximas. Já a discretização em 32 microbacias resultou nas menores vazões máximas, para todos os valores de CN.

Para a chuva de 720 min, verificou-se um aumento gradativo da vazão máxima até a discretização em 4 microbacias, seguido de uma redução gra-

dativa da vazão máxima até a discretização em 32 microbacias. Para a chuva de 60 min de duração, esse comportamento foi observado a partir do CN no valor de 77,5. Antes disso, a discretização em 2 microbacias resultou numa redução da vazão máxima.

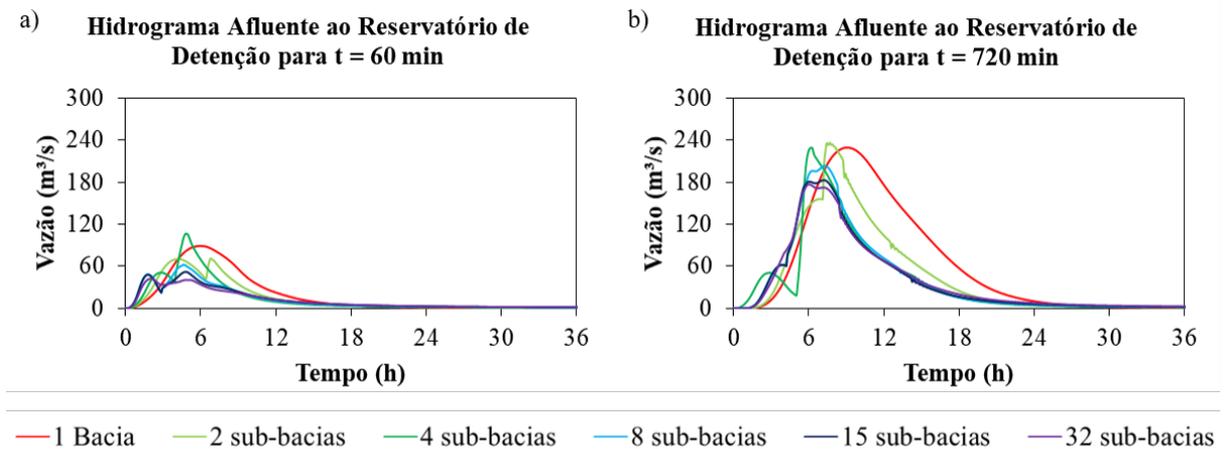
Quanto maior o CN adotado, menor foi a influência da discretização espacial da sub-bacia nos resultados da vazão máxima dos hidrogramas. Esse resultado está de acordo com o estudo de Jha et al. (2004), que atribuem ao CN o motivo da baixa variação dos valores de vazão com o aumento do número de microbacias. A variação da vazão máxima em função do aumento da discretização espacial da sub-bacia hidrográfica foi mais representativa com a chuva de 60min. Esse comportamento já era esperado, uma vez que a duração de 60 minutos é inferior ao tempo de concentração da sub-bacia. Quando a sub-bacia não contribui em sua totalidade, o modelo se torna mais sensível à discretização espacial e ao efeito de amortecimento da propagação de vazão ao longo do comprimento do rio.

**Tabela 1** - Variação da vazão máxima de projeto em função do CN das microbacias, para cada nível de discretização espacial da sub-bacia hidrográfica, tomando como referência os valores das simulações com a sub-bacia não discretizada.

Variação da Vazão Máxima Afluente ao Reservatório de Detenção (%)												
CN	t = 60 min						t = 720 min					
	Vazão (m³/s)	Discretização					Vazão (m³/s)	Discretização				
		1	2	4	8	15		32	1	2	4	8
70	58	-16%	37%	-26%	-45%	-55%	181	9%	36%	-9%	-9%	-20%
72,5	67	-8%	42%	-21%	-40%	-51%	197	9%	36%	-7%	-7%	-13%
75	78	-1%	52%	-17%	-33%	-46%	213	9%	35%	-6%	-4%	-15%
77,5	89	5%	59%	-10%	-27%	-40%	230	9%	35%	-5%	-3%	-12%
80	102	11%	65%	-5%	-18%	-33%	248	10%	34%	-4%	0%	-10%
82,5	115	16%	69%	-1%	-11%	-26%	265	11%	33%	-3%	1%	-8%
85	130	19%	74%	3%	-5%	-21%	284	11%	32%	-2%	2%	-7%
87,5	145	22%	76%	6%	2%	-15%	302	11%	31%	-1%	3%	-6%
90	162	24%	79%	10%	8%	-10%	322	11%	30%	1%	4%	-3%

Na Fig. 5 são apresentados os hidrogramas afluentes ao reservatório de detenção, considerando as condições reais de uso e ocupação do solo, obtidas

por meio da análise de imagens de satélite. Os gráficos contrapõem os diferentes níveis de discretização espacial da sub-bacia hidrográfica analisada.



**Figura 5** - Gráficos comparativos entre os hidrogramas afluentes ao reservatório de detenção para cada nível de discretização espacial da sub-bacia hidrográfica, para chuva de 60 minutos (a); e chuva de 720 minutos (b).

A partir da discretização em 2 microbacias, verificaram-se picos locais de vazão, antecedentes ao valor máximo de vazão dos hidrogramas. Costa (2002) também observou que, quanto maior o nível de discretização, maior o detalhamento dos hidrogramas. As contribuições das microbacias, em função de sua disposição espacial e do formato da sub-bacia, chegam ao reservatório de detenção em momentos diferentes. Dado um tempo de simulação fixo, e maior que o tempo de ascensão dos hidrogramas, o volume de água que chegou ao reservatório de detenção foi maior quanto menos discretizada foi a sub-bacia. No entanto, ao tornar o tempo de simulação suficientemente longo, observou-se que o mesmo volume de água atingiu o reservatório em todos os níveis de discretização, porém de forma mais distribuída ao longo do tempo à medida que se aumenta a discretização da sub-bacia.

A presença de picos locais de vazão é mais acentuada para as simulações com chuva de duração de 60 minutos, menor que o tempo de concentração da sub-bacia. Para essa chuva, o hidrograma da configuração discretizada em 4 microbacias foi o que gerou o maior pico de vazão. Com relação à chuva de 720 minutos, como toda

a sub-bacia passa a contribuir, os hidrogramas das microbacias mais a jusante não atingem o pico antes da chegada dos hidrogramas das microbacias mais a montante.

Para as simulações com a chuva de 720 minutos, os valores das máximas vazões dos hidrogramas das configurações com 2 e com 4 microbacias foram aproximadamente os mesmos que o valor da máxima vazão do hidrograma da sub-bacia hidrográfica não discretizada. A partir da discretização em 4 microbacias, houve uma gradativa redução do valor da vazão máxima do hidrograma até a discretização em 32 microbacias (23% menor que a vazão máxima do hidrograma da sub-bacia não discretizada).

As instabilidades verificadas em alguns dos hidrogramas são decorrentes das hipóteses assumidas para o desenvolvimento do modelo, como a criação de seções fictícias para a recepção de vazões de duas microbacias em uma mesma seção. Essas instabilidades, no entanto, foram insignificantes em relação aos resultados obtidos.

Mahunguana e Bravo (2015), utilizando o modelo IPSH1 para o cálculo dos hidrogramas de projeto, e o modelo SWMM 5.0 para propagação de

vazão, observaram que a vazão de pico tende a aumentar com o aumento da discretização em microbacias. Esses resultados contrapõem-se com os observados neste trabalho e nos trabalhos de Garcia et al. (2004) e Garcia e Paiva (2006), com aplicação do modelo chuva-vazão SWMM. Essa diferença pode estar relacionada, além da escolha do modelo chuva-vazão, à forma da sub-bacia, o que sugere que seja realizado um estudo focado nesse aspecto.

Zanandrea e Silveira (2018) recomendam a discretização da sub-bacia hidrográfica para representar da melhor maneira possível a área de estudo, de modo que todas as subáreas recebam precipitação e produzam escoamento superficial.

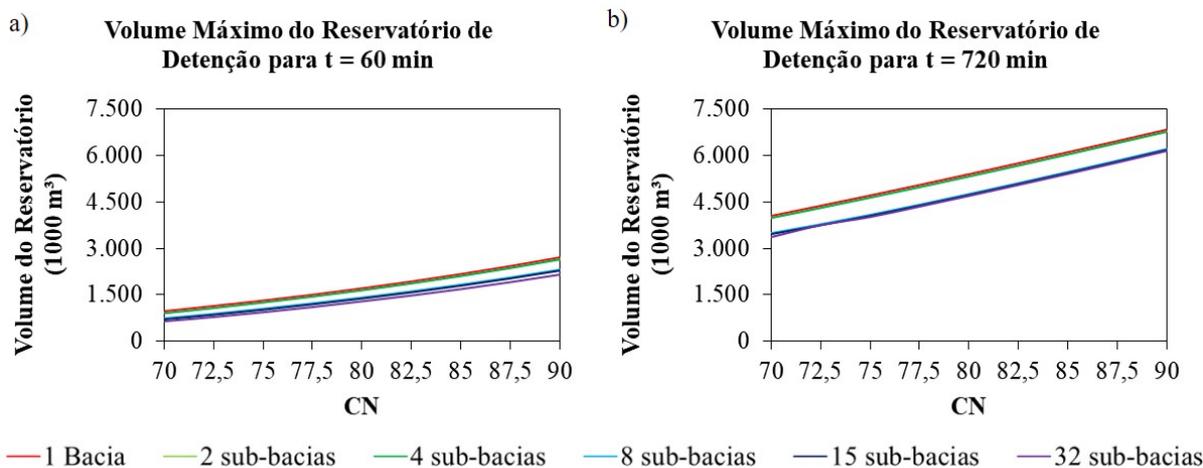
### 3.2 Volume Máximo do Reservatório de Detenção

Na Fig. 6 são apresentados, para as duas durações de chuva, gráficos contrapondo os máximos volumes armazenados no reservatório de detenção durante as simulações no SWMM, em função da variação do CN, para cada nível de discretização espacial da sub-bacia hidrográfica.

O volume máximo do reservatório de detenção diminuiu à medida que aumentou a discretização da sub-bacia, uma vez que quanto mais discretizada a sub-bacia, mais distribuída ao longo do tempo é a chegada da água ao reservatório. A variação do volume máximo do reservatório de detenção foi mais expressiva a partir da discretização em 8 microbacias, para os diferentes valores de CN.

Na Tabela 2, é apresentada, para as chuvas de 60 minutos e 720 minutos, respectivamente, a variação do volume do reservatório de detenção entre os níveis de discretização espacial da sub-bacia hidrográfica, tomando como valores de referência os resultados da simulação da sub-bacia não discretizada.

Para ambas as durações de chuvas, dado um mesmo CN, o volume máximo do reservatório de detenção diminuiu gradativamente quando maior a discretização da sub-bacia. A variação foi maior quanto menor o valor de CN e, assim como na análise da vazão máxima do hidrograma afluente, foi mais significativa para a chuva de 60 minutos.



**Figura 6** - Gráficos comparativos entre o volume máximo do reservatório de detenção, em função do CN das microbacias, para cada nível de discretização espacial da sub-bacia hidrográfica, considerando a) chuva de 60min; e b) chuva de 720min.

**Tabela 2** - Variação do volume do reservatório de detenção em função do CN das microbacias, para cada nível de discretização espacial da sub-bacia hidrográfica, tomando como referência os valores da sub-bacia não discretizada.

Variação do Volume Máximo do Reservatório de Detenção (%)												
CN	t = 60 min						t = 720 min					
	Volume (1000m <sup>3</sup> )	Discretização					Volume (1000m <sup>3</sup> )	Discretização				
		1	2	4	8	15		32	1	2	4	8
70	980	-8%	-8%	-23%	-27%	-33%	4.045	-2%	-2%	-13%	-14%	-17%
72,5	1.149	-7%	-7%	-22%	-25%	-31%	4.369	-2%	-2%	-13%	-14%	-14%
75	1.324	-5%	-5%	-20%	-23%	-29%	4.701	-2%	-1%	-13%	-14%	-15%
77,5	1.513	-5%	-5%	-18%	-21%	-27%	5.039	-1%	-1%	-12%	-13%	-14%
80	1.719	-4%	-4%	-17%	-19%	-25%	5.385	-1%	-1%	-11%	-12%	-13%
82,5	1.943	-4%	-4%	-16%	-18%	-24%	5.737	-1%	-1%	-11%	-12%	-12%
85	2.183	-3%	-3%	-16%	-17%	-23%	6.093	-1%	-1%	-10%	-11%	-11%
87,5	2.442	-3%	-3%	-15%	-17%	-22%	6.452	-1%	-1%	-9%	-10%	-11%
90	2.721	-3%	-2%	-15%	-16%	-21%	6.817	-1%	-1%	-9%	-9%	-10%

A modelagem computacional dos reservatórios de detenção é uma etapa importante no seu dimensionamento, uma vez que essas estruturas devem ser dimensionadas considerando a condição de volume crítica. Os resultados obtidos neste trabalho apontam que o nível de discretização espacial da sub-bacia hidrográfica para a qual o reservatório de detenção será implementado possui grande influência no seu dimensionamento.

Garcia e Paiva (2006) explicam que uma maior discretização da sub-bacia hidrográfica, em microbacias, fornece resultados mais precisos para a análise da altura de inundação, construção de estruturas hidráulicas e análises em pontos específicos da sub-bacia.

#### 4 CONCLUSÕES

A criação de uma interface que integra QGIS, AutoCAD e SWMM, por meio de ferramentas gráficas, facilita a entrada e a manipulação de dados e automatiza processos manuais. A modelagem proposta neste trabalho mostrou-se adequada para a realização de simulações hidráulico-hidrológicas, ao associar o modelo chuva-vazão do NRCS, amplamente utilizado em estudos hidrológicos, ao consolidado modelo de propaga-

ção de vazão do SWMM, que resolve as equações completas de Saint-Venant.

As simulações com o maior grau de discretização da sub-bacia hidrográfica, em 32 microbacias, resultaram nos menores valores de vazão máxima do hidrograma afluente ao reservatório de detenção, devido ao efeito de amortecimento. O volume de água que atingiu o reservatório foi mais distribuído ao longo do tempo. Todas as simulações realizadas obedeceram à Lei da Continuidade, não havendo perda de massa no sistema.

No entanto, a redução do pico de vazão do hidrograma com o aumento da discretização da sub-bacia hidrográfica não obedeceu a uma relação contínua. Em alguns casos, dependendo do valor do CN, verificou-se que a discretização em 2 e em 4 microbacias provocou picos de vazão superiores aos da sub-bacia não discretizada.

Esses resultados sugerem que a forma da bacia é um parâmetro que influencia na relação entre discretização espacial da bacia hidrográfica e máximos valores de vazão. É necessária a realização de estudos com bacias hidrográficas de diferentes formatos para expandir os resultados deste trabalho. Ademais, observou-se que, quanto maior o valor do CN, menor foi a influência da discretização espacial sobre os resultados.

Quanto ao máximo volume armazenado no reservatório de detenção, foi possível afirmar com clareza que seu valor foi tão menor quanto mais discretizada a sub-bacia hidrográfica. Essa redução é influenciada pelo CN, uma vez que é o parâmetro determinante do modelo chuva-vazão do NRCS, e também pela duração da chuva de projeto.

Nesse contexto, a discretização da sub-bacia em 32 microbacias é a mais recomendada para o caso apresentado. Além de retornar resultados mais precisos e próximos da realidade, também gera um dimensionamento que reduz os custos de implementação de reservatórios de detenção. Apesar da necessidade de uma maior quantidade de dados de entrada, a metodologia apresentada neste trabalho automatiza a obtenção desses dados, facilitando o processo.

## 5 AGRADECIMENTOS

À Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (FUNCAP) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo financiamento desta pesquisa. Ao Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental (DEHA) da Universidade Federal do Ceará, pelo suporte técnico.

## 6 CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

**Resumo:** Silveira Neto JP; **Introdução:** Silveira Neto JP; **Materiais e Métodos:** Silveira Neto JP, Castro MAH, Monteiro CB, Silva CE, Bezerra AA; **Resultados e Discussões:** Silveira Neto JP, Castro MAH; **Conclusões:** Silveira Neto JP, Castro MAH; **Redação – Primeira versão:** Silveira Neto JP; **Redação - Revisão & Edição:** Castro MAH, Monteiro CB, Silva CE, Bezerra AA; **Infraestrutura:** Castro MAH.

## 7 REFERÊNCIAS

- ASSUNÇÃO, V. R. A. **Proposta de metodologia de cálculo para reservatórios de detenção em bacias hidrográficas urbanizadas**. 2012. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.
- BAIAMONTE, G. SCS curve number and green-ampt infiltration models. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 24, n. 10, p. 04019034, 2019. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001838](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001838).
- BRASIL. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes. **Manual de hidrologia básica para estruturas de drenagem**. 2. ed. Rio de Janeiro: IPR, 2005. 133 p.
- COSTA, J. **Aplicação de distintas discretizações espaciais no modelo hidrológico concentrado precipitação-vazão HEC-HMS**. 2002. 127 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília, Brasília, 2002.
- DUTTA, D.; NAKAYAMA, K. Effects of spatial grid resolution on river flow and surface inundation simulation by physically based distributed modelling approach. **Hydrological Processes**, v. 23, n. 4, p. 534-545, 2009. <https://doi.org/10.1002/hyp.7183>.
- GARCIA, J. I. B.; PAIVA, E. M. C. D.; BRITES, A. P. Z.; PAIVA, R. C. D. Avaliação da discretização em uma bacia hidrográfica urbana, através do modelo SWMM. In: Congresso Latino-americano de Hidráulica, 21., 2004, São Pedro, SP. **Anais [...]**. Disponível em: <https://www.ufsm.br/app/uploads/sites/535/2020/10/b377.pdf>.
- GARCIA, J. I. B.; PAIVA, E. M. C. D. Monitoramento hidrológico e modelagem da drenagem urbana da bacia do Arroio Cancela – RS. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 11, n. 4, p. 99-108, 2006. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v11n4.p99-108>.
- JENA, S. K.; TIWARI, K. N.; ASHISH, P.; MISHRA, S. K. RS and geographical information system-based evaluation of distributed and composite curve number techniques. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 17, n. 11, p. 1278-1286, 2012. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000651](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000651).
- JHA, M.; GASSMAN, P. W.; SECCHI, S.; GU, R.; ARNOLD, J. Effect of watershed subdivision on SWAT flow, sediment and nutrient predictions. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 40, n. 3, p. 811-825, 2004. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2004.tb04460.x>.
- MAHUNGUANA, M. J.; BRAVO, J. M. Avaliação do efeito de critérios de projeto no dimensionamento de redes de macrodrenagem através da simulação hidrológico-hidráulica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 20, n. 2, p. 484-495, 2015. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v20n2.p484-495>.

- MAIDMENT, D. R.; OLIVERA, F.; CALVER, A.; EATHERALL, A.; FRACZEK, W. Unit Hydrograph derived from a spatially distributed velocity field. **Hydrological Process**, v. 10, n. 6, p. 831-844, 1996. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(199606\)10:6<831::AID-HYP374>3.0.CO;2-N](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(199606)10:6<831::AID-HYP374>3.0.CO;2-N).
- MISHRA, S. K.; PANDEY, A.; SINGH, V. P. Special issue on soil conservation service curve number (SCS-CN) methodology. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 17, n. 11, p. 1157-1157, 2012. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000694](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000694).
- MONTEIRO, C. B. **Bases técnicas para reformulação da atual legislação referente ao volume do reservatório de retenção na cidade de Teresina/PI**. 2021. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento de Meio Ambiente) – Universidade Federal do Piauí, Teresina, 2021.
- NRCS - NATURAL RESOURCES CONSERVATION SERVICE. Estimation of direct runoff from storm rainfall. In: \_\_\_\_\_. **National engineering handbook**: Part 630 - Hydrology. Washington, DC: United States Department of Agriculture, 2004. 78 p.
- PAZ, A. R.; BUARQUE, D. C.; COLLISCHONN, W.; VICTORIA, D. C.; ANDRADE, R. G. Discretização de modelos hidrológicos de grande escala: grade regular x mini-bacias. In: XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 19., 2011, Maceió. **Anais [...]**. Disponível em: <https://www.abrhidro.org.br/SGCv3/publicacao.php?PUB=3&ID=81&SUMARIO=1359>.
- PEREIRA, S. P.; FERNANDES, L. B.; SOUZA FILHO, F. A. de; LIMA NETO, I. E. Modelagem do macrossistema de coleta de esgotos de Fortaleza-CE. **Revista DAE**, v. 69, n. 232, p. 189-201, 2021. <https://doi.org/10.36659/dae.2021.070>.
- PONTES, P. R. M.; COLLISCHONN, W.; FAN, F. M.; PAIVA, R. C. D.; BUARQUE, C. D. Modelagem hidrológica e hidráulica de grande escala com propagação inercial de vazões. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 20, n. 4, p. 888-904, 2015. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v20n4.p888-904>.
- PORTO, R. M. **Hidráulica Básica**. 4. ed. rev. São Carlos: EESC-USP, 2006. 540 p.
- PORTO, R. M. Metodologia de cálculo para o planejamento de bacias de retenção. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n. 3, p. 135-149, 2003. <https://doi.org/10.21168/rbrh.v8n3.p135-149>.
- ROCHA, B. S.; LEÃO, J. C.; FERNANDES, R. J. A. R.; SOUZA, C. D.; ARAÚJO, J. P. M. Modelo da distribuição temporal de chuvas intensas no município de Teresina, PI. In: Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, 13., 2016, Aracaju. **Anais [...]**. Disponível em: <http://www.evolvedoc.com.br/srhne/>.
- SANZ-RAMOS, M.; MARTÍ-CARDONA, B.; BLADÉ, E.; SECO, I.; AMENGUAL, A.; ROUX, H.; ROMERO, R.; NRCS-CN Estimation from onsite and remote sensing data for management of a reservoir in the Eastern Pyrenees. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 25, n. 9, p. 05020022, 2020. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0001979](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0001979).
- SILVA, S. R.; SILVA JÚNIOR, M. A. B.; OLIVEIRA, R. L. M. Modelagem computacional de reservatório de retenção sob logradouro: uma alternativa para controle de alagamentos em área densamente urbanizada do Recife/PE. **Revista DAE**, v. 68, n. 226, p. 196-212, 2020. <https://doi.org/10.36659/dae.2020.075>.
- TERESINA. **Plano diretor de drenagem urbana de Teresina**. v. 25. t. 1. Teresina: Concremat Engenharia, 2012a. 80 p.
- TERESINA. **Plano diretor de drenagem urbana de Teresina**. v. 25. t. 5. Teresina: Concremat Engenharia, 2012b. 550 p.
- TERESINA. **Revisão e atualização do plano diretor do município de Teresina-PI**. Leitura técnica. 2º Produto. Teresina: Latus, 2017. 126 p.
- ZANANDREA, F.; SILVEIRA, A. L. L. Effects of LID implementation on hydrological processes in an urban catchment under consolidation in Brazil. **Journal of Environmental Engineering**, v. 144, n. 9, p. 04018072, 2018. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0001417](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001417).