

## ANÁLISE DE INCERTEZAS APLICADA AO MODELO HIDROLÓGICO CHUVA-VAZÃO SCS – ATRIBUTO CURVE NUMBER

*Bárbara Hass Miguel<sup>1\*</sup> & Camilo Daleles Rennó<sup>2</sup> & Antônio Miguel Vieira Monteiro<sup>3</sup>*

**Resumo** – A confiabilidade de um modelo hidrológico pode ser investigada por meio de técnicas de análise de incertezas e de sensibilidade às quais permitem quantificar e representar um intervalo de valores que caracterizam o fenômeno modelado. Com base nessas considerações, o objetivo deste estudo consistiu na aplicação do modelo hidrológico SCS na Bacia Hidrográfica do Rio Monjolinho, localizada na mancha urbana do município de São Carlos-SP. Nesse estudo, realizou-se a inferência do atributo numérico CN (Curve Number) no cálculo da chuva efetiva para uma precipitação ocorrida no dia 22 de outubro de 2013, registrada por radar meteorológico. Foram exploradas medidas de incerteza definidas a partir da média e do desvio padrão através do Método de Monte Carlo. Neste contexto, concluiu-se que as áreas que apresentaram maiores incertezas coincidiram com as regiões que registraram precipitação mais concentradas e que apresentam o uso infraestrutura urbana predominante. O tipo de uso e ocupação da terra de uma determinada área possui uma relação intrínseca com os padrões de fluxo e com a incerteza do atributo CN.

**Palavras-Chave** – Modelo hidrológico, medidas de incerteza, Curve number.

## UNCERTAINTY ANALYSIS APPLIED TO HYDROLOGIC MODEL RAINFALL-RUNOFF SCS - ATTRIBUTE CURVE NUMBER

**Abstract** – The reliability of a hydrological model can be investigated through uncertainty and sensitivity analysis techniques to quantify and represent a range of values that characterize the modeling phenomenon. Based on these considerations, the objective of this study was to apply the SCS hydrological model in the Monjolinho River Basin, located in the urban spot of São Carlos-SP. This study, the numerical attribute CN (Curve Number) was inferred in the calculation of effective rainfall for a precipitation occurred on October 22, 2013, recorded by meteorological radar. Uncertainty measures defined from the mean and standard deviation were explored through the Monte Carlo Method. In this context, it was concluded that the areas that presented the greatest uncertainties coincided with the regions that registered the most concentrated precipitation and that present the predominant urban infrastructure. The type of land use and occupation of a given area has an intrinsic relationship with the surface change of flow patterns and the uncertainty of the CN attribute.

**Keywords** – Hydrologic modeling, uncertainty measures, Curve number.

## INTRODUÇÃO

A transformação dos centros urbanos em áreas com altas densidades populacionais apresentam efeitos negativos que são refletidos principalmente sobre o sistema de drenagem das

<sup>1</sup> Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE. Brasil. E-mail: [barbara.miguel@inpe.br](mailto:barbara.miguel@inpe.br)

<sup>2</sup> Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE. Brasil. E-mail: [camilo@dpi.inpe.br](mailto:camilo@dpi.inpe.br)

<sup>3</sup> Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, INPE. Brasil. E-mail: [miguel@dpi.inpe.br](mailto:miguel@dpi.inpe.br)

\*Autor correspondente. E-mail: [barbara.miguel@inpe.br](mailto:barbara.miguel@inpe.br)

bacias hidrográficas (TUCCI, 1998, 2003). A existência de áreas altamente impermeabilizadas traz como consequência o aumento do volume escoado superficialmente, causando aumento nas vazões que excede em até seis vezes a vazão de áreas com cobertura vegetal (TUCCI, 2008; COLLISCHONN & RUTINÉLIA, 2011).

De acordo com o estudo de Lorandi et al. (2001), São Carlos, município do estado de São Paulo, é um exemplo onde a ocupação do solo foi realizada sem planejamento. Sabe-se que um dos principais problemas da Bacia Hidrográfica do Rio Monjolinho, bacia urbana do município, é o extravasamento do canal principal após as chuvas intensas, culminando na ocorrência de enchentes em diversos pontos da cidade. Nesse contexto, a modelagem hidrológica vem sendo cada vez mais utilizada para representar os processos e os mecanismos hidrológicos de bacias hidrográficas.

Um importante modelo utilizado na simulação hidrológica é o modelo que simula a transformação da chuva em vazão. Dentro dessa categoria, destaca-se o modelo chuva-vazão desenvolvido pelo Serviço de Conservação do Solo (SCS), que é muito utilizado em estudos sobre a drenagem de bacias. Esse modelo baseia-se no conceito de que a lâmina de escoamento superficial produzida em um dado evento é uma função da altura total da lâmina precipitada e de um parâmetro *Curve Number* “CN”, que representa as perdas que ocorrem, principalmente, devido à infiltração, à interceptação vegetal e à retenção em depressões do terreno (ASCE, 1996).

Devido à dificuldade em se modelar atributos numéricos e espaciais, como é o caso da escolha dos valores de CN, se faz necessário analisar a sensibilidade desses modelos em relação à propagação de incertezas. A incerteza é uma estimativa da magnitude do erro condicionada aos conhecimentos a priori, por exemplo da variabilidade espacial e temporal em relação ao atributo (FELGUEIRAS, 1999).

Mediante essas considerações, o objetivo deste estudo consistiu na análise da precipitação ocorrida na Bacia Hidrográfica do Rio Monjolinho, no município de São Carlos-SP, no dia 22 de outubro de 2013, registrada por radar meteorológico. Nesse estudo, foi considerada a inferência do atributo numérico CN, sendo exploradas medidas de incerteza definidas a partir da média e do desvio padrão. A informação de incerteza é útil para se avaliar a sensibilidade do modelo assumido para um determinado atributo, nesse caso, está relacionado com os valores de *Curve Number* adotados e sua influência no resultado do cálculo final da chuva efetiva para a bacia.

## **METODOLOGIA**

### **Área de estudo**

O presente trabalho tem como área de estudo a Bacia do Rio Monjolinho (Figura 1), localizada no município de São Carlos, estado de São Paulo. São Carlos está localizado na região centro-oeste do estado de São Paulo, nas coordenadas geográficas 22° 0' 55" Latitude Sul e 47° 53' 28" Longitude Oeste, distante 240 km da capital.

A bacia compreende uma área total de 71,3 Km<sup>2</sup> e está totalmente inserida na mancha urbana do município de São Carlos, por isso está sujeita a todos os impactos ambientais decorridos da urbanização (LORANDI et al., 2001).

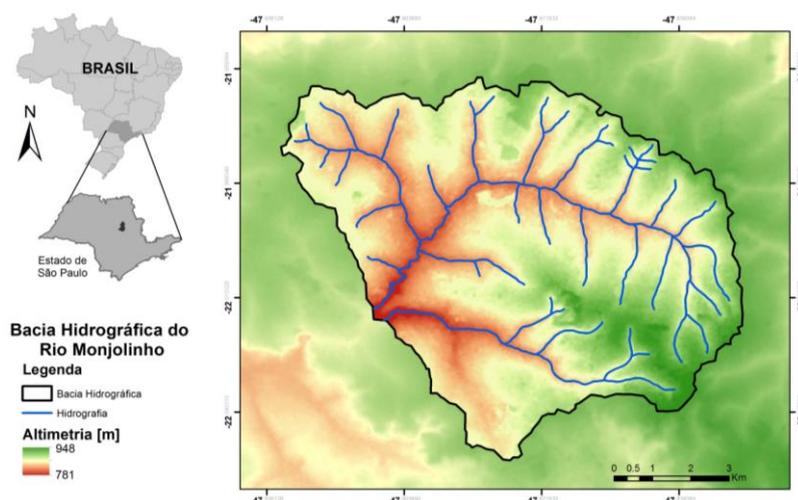


Figura 1: Mapa da localização da área de estudo.

O clima da região estudada é classificado, de acordo com o sistema de Köppen, como sendo do tipo Cwa, isto é, mesotérmico subtropical úmido de inverno seco, em que a temperatura média do mês mais frio é inferior a 18°C e a do mês mais quente ultrapassa 22°C.

### Modelo Hidrológico *Soil Conservation Service* (SCS)

Para o modelo SCS, a geração de escoamento ( $Q$ ) em milímetros é definida pela entrada de chuva ( $P$ ); um parâmetro ( $\lambda$ ) tipicamente  $\approx 0,2$ , que está relacionado à absorção inicial da chuva ( $I_a$ ) antes que a mesma infiltre ou escoe no terreno, sendo que  $I = \lambda S_{max}$ ; e a capacidade máxima de armazenamento do solo  $S_{max}$  (BEVEN, 2012). Assim têm-se as seguintes equações:

$$\begin{cases} Q = \frac{(P - \lambda S_{max})^2}{(P - \lambda S_{max}) + S_{max}} & \text{se } P > I, \\ Q = 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (1)$$

Por meio do  $CN$  é possível determinar  $S_{max}$  em milímetros de acordo com:

$$S_{max} = \left( \frac{100}{CN} - 1 \right) 254 \quad (2)$$

onde,  $CN$  é um valor tabelado em função do uso e cobertura da terra, tipo e condição hidrológica do solo. O grupo hidrológico do solo apresentado é definido como: grupo A, com alta taxa de infiltração; grupo B, com taxa de infiltração moderada e moderadamente drenado; grupo C, com baixa taxa de infiltração e camada impermeável; e grupo D, solos com baixa taxa de infiltração e que estão na maior parte do tempo saturados (BEVEN, 2012).

ASCE (1996) propôs um método intitulado *Antecedent Moisture Content* – AMC para relacionar a umidade antecedente do solo com o valor do  $CN$ . Os valores de  $CN$  encontrados nas tabelas do SCS correspondem ao valor para a situação média, AMC II ( $CN_2$ ). As correções para AMC I (Equação 3) e AMC III (Equação 4) são calculadas em função do valor de  $CN_2$  por (ARNOLD e WILLIAMS, 1995):

$$CN_1 = CN_2 - \frac{20(100 - CN_2)}{100 - CN_2 + \exp[2,533 - 0,0636(100 - CN_2)]} \quad (3)$$

$$CN_3 = CN_2 \exp[0,00673(100 - CN_2)] \quad (4)$$

Os valores tabelados de  $CN_2$  são estabelecidos para uma bacia com declividade média de 5%. Arnold e Williams (1995) propõem um ajuste deste valor para outras declividades por meio da equação 5:

$$CN_{2S} = \frac{1}{3}(CN_3 - CN_2) [1 - 2 \exp(-13,86\theta)] + CN_2 \quad (5)$$

onde,  $\theta$  é a declividade média da bacia em porcentagem [%].

Após o cálculo de  $CN_{2S}$ , as correções de  $CN_1$  e  $CN_3$  pelas equações (3) e (4) respectivamente, devem ser feitas substituindo-se o valor de  $CN_2$  por  $CN_{2S}$ .

### Dados de radar meteorológico

A precipitação utilizada como entrada no modelo refere-se ao acumulado ocorrido no dia 22 de outubro de 2013 das 15:38h às 18:08h sobre a bacia do rio Monjolinho, captada pelo radar meteorológico do IPMet (Instituto de Pesquisas Meteorológicas) de Bauru-SP. As taxas de precipitação são calculadas mediante a relação entre  $Z$  (refletividade) e  $R$  (taxa de precipitação) do radar, adotando a relação empírica entre  $Z$  e  $R$  em uma mesma fórmula geral dada por:

$$Z = aR^b \quad (6)$$

onde  $Z$ , em  $\text{mm}^6/\text{m}^3$  ou em decibéis (dBZ) e  $R$ , em  $\text{mm}/\text{h}$ ,  $a$  e  $b$  são constantes estimadas. Nesse estudo, optou-se pela relação  $Z$ - $R$  de Marshall e Palmer (1948). Marshall e Palmer encontraram empiricamente os valores de 200 e 1,6 para os parâmetros  $a$  e  $b$  respectivamente.

## Medidas de incerteza (Método de Monte Carlo)

A incerteza é a diferença entre a realidade e sua representação, incluindo erros, falhas e o conceito estatístico de variação (FELGUEIRAS, 1999). Uma das maneiras de melhorar os resultados de um modelo é repeti-lo inúmeras vezes de acordo com o método de Monte Carlo. Nesse trabalho, os valores de CN foram escolhidos com base na tabela disponível em Beven (2012), sendo geradas 1000 combinações aleatórias de valores de CN, de acordo com a tabela 1.

Tabela 1: Valores inferidos de CN para cada tipo de solo classificado e seu respectivo grupo hidrológico. Fonte: adaptado de Beven (2012).

Tipo de cobertura do solo	Grupo A	Grupo B	Grupo C
Pastagem	46-54	67-69	-
Infraestrutura Urbana	81-92	91-95	-
Vegetação Natural	32-36	55-60	68-73
Corpos Hídricos	98	98	98
Agricultura	56-61	65-70	-
Solo Exposto	69-74	78-83	-

Assumindo que só tenhamos erros de origem aleatória, o valor que se aproxima mais do valor real é a média amostral (Equação 7).

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n x_i \quad (7)$$

A dispersão dos resultados ao redor da média foi mensurada através da variância amostral (Equação 8).

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=0}^n (x_i - \bar{x})^2 = \frac{n}{n-1} (\overline{x^2} - \bar{x}^2) \quad (8)$$

Utilizou-se o desvio padrão para representar a quão dispersa estão as medidas. Se os resultados das medidas não estão simetricamente distribuídos em torno da média, deve-se ter cuidado com a propagação da incerteza (Equação 9).

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (9)$$

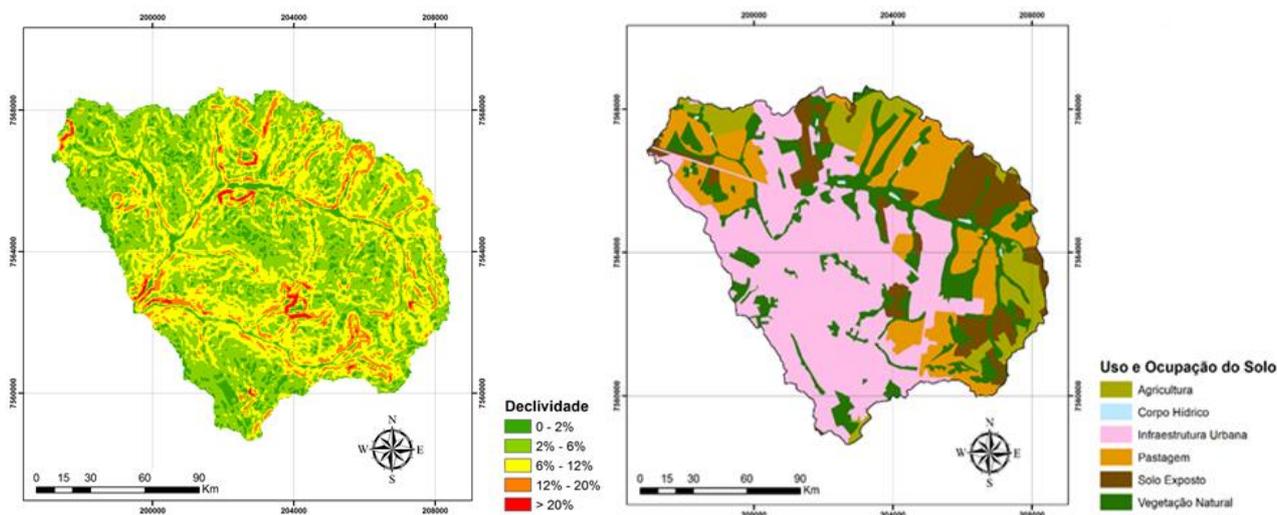
## Dados de Entrada do Modelo SCS (*input*)

O mapa de solos foi elaborado a partir da carta pedológica de São Carlos (SF-23-Y-A-I) feita pelo Levantamento Pedológico Semidetalhado do Estado de São Paulo (1:100.000). O mapa de uso e ocupação do solo foi elaborado por meio de classificação manual, a partir de imagens do satélite Landsat 8 do dia 16 de outubro de 2013. A declividade foi gerada através do Modelo Digital de Elevação SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) de 1 arco segundo de resolução espacial.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

De acordo com a classificação do índice de fragilidade ambiental de ROSS (1994), a bacia apresenta fragilidade ambiental baixa e média em sua maior parte (Figura 2), podendo ser considerada uma bacia plana, sendo assim suscetível à ocupação urbana.

O tipo de uso e ocupação do solo (Figura 3) é uma das principais entradas para o modelo hidrológico SCS. Nesse estudo, foram classificados seis diferentes tipos de uso do solo: agricultura, corpo hídrico, infraestrutura urbana, pastagem, solo exposto e vegetação natural. A infraestrutura urbana é o tipo de uso do solo mais abrangente na bacia, sendo um indicador de que a impermeabilização do solo possa influenciar no volume de escoamento superficial e na velocidade de fluxo hidrológico da bacia.



Figuras 2 e 3: Mapa da Declividade e do Uso e Ocupação do solo da área de estudo.

### Análise das medidas de Incerteza

O evento de precipitação concentrou-se na cabeceira da bacia. Na região central da bacia pode-se observar o gradiente da distribuição da precipitação (Figura 4). As regiões no mapa destacadas em azul apresentaram a precipitação mais concentrada, chegando ao acumulado máximo de 48,47mm e mínimo de 25,38mm próximo ao exutório.

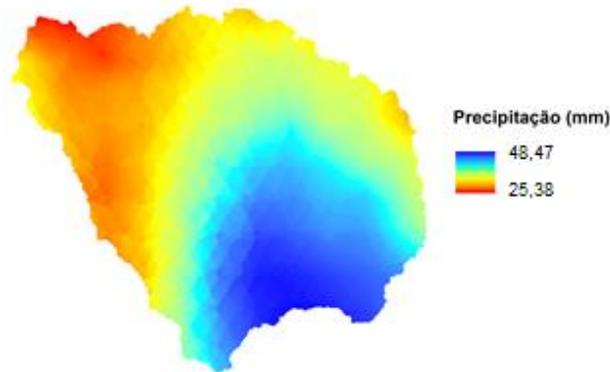
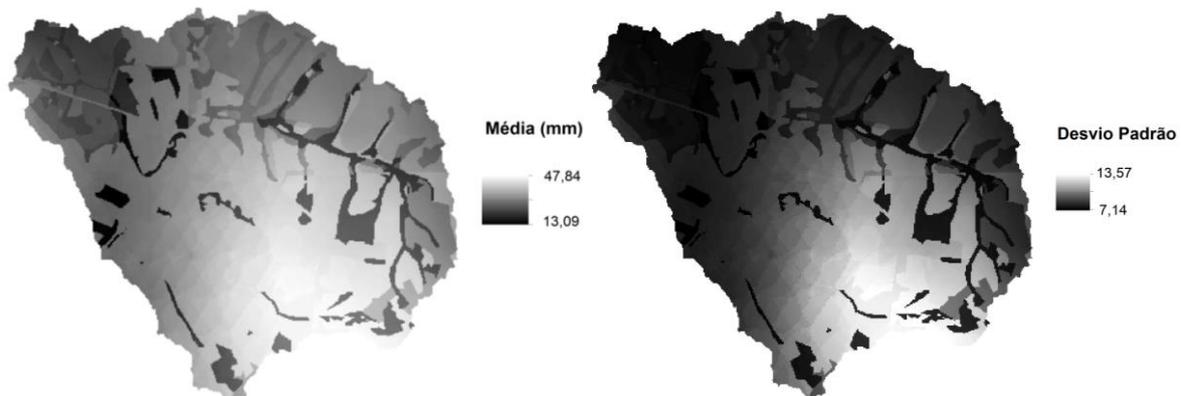


Figura 4: Precipitação registrada pelo radar no dia 22 de outubro de 2013.

As incertezas foram estimadas pela metodologia baseada nos parâmetros estatísticos de média (Figura 5) e de desvio padrão (Figura 6) respectivamente. As regiões de maior incerteza são aquelas que se apresentaram mais claras nos mapas.



Figuras 5 e 6: Mapas de valores estimados de *Curve Number* baseados nos parâmetros estatísticos de média e do desvio padrão pelo Método de Monte Carlo.

Nas análises dos mapas de incerteza da chuva efetiva média e do desvio padrão, observou-se que regiões espaciais com maior variabilidade do atributo *CN* apresentaram incertezas mais expressivas. Essas áreas coincidiram com as regiões que registraram precipitação mais concentradas e que apresentam o uso infraestrutura urbana predominante. A impermeabilização do solo por diferentes tipos de materiais, em diferentes concentrações como asfalto das ruas e o concreto das calçadas provavelmente são os influenciadores nesse resultado de incerteza.

## CONCLUSÕES

Os conceitos, os resultados e as análises apresentados neste trabalho mostram que as metodologias de inferência são opções interessantes para modelagem de atributos. Medidas de

incerteza foram exploradas e o uso dessas medidas depende da natureza do atributo modelado e do tipo de aplicação que fará uso do modelo criado. A principal vantagem do método de Monte Carlo é que ele é de aplicação geral, podendo ser aplicado a modelos lógicos, conceituais ou empíricos. Nesse trabalho, as áreas que apresentaram maiores incertezas coincidiram com as regiões que registraram precipitação mais concentradas e que apresentam o uso infraestrutura urbana predominante. O tipo de material utilizado na impermeabilização do solo pode ter influenciado nesse resultado de incerteza. É importante ressaltar que a incerteza medida pode ser diminuída, local e globalmente, com amostragens mais refinadas nessas regiões.

## REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS (ASCE). **Hydrology Handbook**. 2 ed. New York, USA: ASCE, 1996. 784 p.
- ARNOLD, J.G.; WILLIAMS, J.R. SWRRB -- **A watershed scale model for soil and water resources management**. In: SINGH, V. P. (Ed.) *Computer Models of Watershed Hydrology*. Highlands Ranch, CO: Water Resources, 1995.
- BEVEN, K. J. **Rainfall-Runoff Modelling: the primer**. 2 ed. Lancaster, UK: John Wiley & Sons, 2012, 457 p.
- COLLISCHONN, W.; RUTINÉLIA, T. **Introduzindo Hidrologia**. The Watershed Game. IPH – UFRGS, 2011.
- FELGUEIRAS C. A. **Modelagem Ambiental com Tratamento de Incertezas em Sistemas de Informação Geográfica: O Paradigma Geoestatístico por Indicação**. Tese (Doutorado em Computação Aplicada) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1999.
- LORANDI, R.; TAKEMOTO, F.; SALVADOR, N. N. B; TORRESAN, F. E. **Carta de potencial à erosão laminar da parte superior da bacia do córrego do Monjolinho (São Carlos, SP)**. *Revista Brasileira de Cartografia*, v.53, p.111-117, 2001.
- MARSHALL, J. S; PALMER, W. MCK. **The distribution of raindrops with size**. *Journal of Meteorology*. 5, p. 165-166, 1948.
- ROSS, J. L. S. **Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados**. *Revista do Departamento de Geografia*. n.8, p.63-74. 1994.
- TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. *Associação Brasileira de Recursos Hídricos*, Editora Universitária UFRGS, Porto Alegre, 1998.
- TUCCI, C. E. M.; COLLISHONN, W. **Previsão de vazão**. In: Tucci, C. E. M.; Braga, B. (org.). **Clima e recursos hídricos no Brasil**. Porto Alegre: ABRH, p.281-348, 2003.
- TUCCI, C.E.M. **Gestão integrada das águas urbanas**. *Revista de Gestão de Águas da América Latina*, vol.5, n°2, p.71–81, 2008.