

## COMPARAÇÃO DE MODELOS HIDROLÓGICOS UTILIZANDO O HEC-HMS

*Francisco Thibério Pinheiro Leitão<sup>1\*</sup>, Amanda Sousa Sampaio<sup>2</sup>, Pétrus Eduardo Feliciano de Sá<sup>3</sup>, Tatiane Lima Batista<sup>4</sup> & John Kenedy Araujo<sup>5</sup>*

**Resumo** – Os modelos hidrológicos são ferramentas fundamentais para realização de simulações e obtenção de resultados que possam auxiliar a tomada de decisões. Normalmente, utilizam-se modelos de chuva-vazão para a partir de dados de chuva obter dados de vazão, que podem ser utilizados, por exemplo, para estudos de inundação. Nesse âmbito, com base em valores de precipitação e vazões observados, foi realizada uma comparação entre o ajuste dos modelos, utilizando diversas combinações baseadas nos métodos de infiltração SCS–CN e Green-Ampt, e nos métodos de transformação chuva-vazão de Clark e SCS-Hidrograma Unitário.

**Palavras-Chave** – HEC-HMS, Modelos Hidrológicos.

## COMPARISON OF HYDROLOGIC MODELS USING HEC-HMS

**Abstract** – Hydrological models are fundamental tools for conducting simulations and obtaining results that can aid in decision making. Typically, rainfall-flow models are used to derive rainfall data from rainfall data, which can be used, for example, for flood studies. In this context, based on precipitation values and flow rates observed, a comparison was made between the adjustment of the models, using different combinations based on the SCS-CN and Green-Ampt infiltration methods, and on methods of transforming rainfall into flow: Clark and SCS Unit Hydrograph.

**Keywords** – HEC-HMS, Hydrological Models.

---

<sup>1</sup> Mestrando em Recursos Hídricos do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental (UFC): [thiberioleitao@gmail.com](mailto:thiberioleitao@gmail.com)

<sup>2</sup> Mestranda em Recursos Hídricos do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental (UFC): [amandasampaio@alu.ufc.br](mailto:amandasampaio@alu.ufc.br)

<sup>3</sup> Mestrando em Recursos Hídricos do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental (UFC): [petruscrato@gmail.com](mailto:petruscrato@gmail.com)

<sup>4</sup> Mestranda em Recursos Hídricos do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental (UFC): [tatianelima.eng@gmail.com](mailto:tatianelima.eng@gmail.com)

<sup>5</sup> Doutor em Recursos Hídricos e Professor do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental (UFC): [kenedy@ufc.br](mailto:kenedy@ufc.br)

## 1. INTRODUÇÃO

O HEC-HMS (*Hydrologic Modeling System*) é um sistema de modelagem hidrológica desenvolvido para simular os processos de chuva-deflúvio em bacias hidrográficas. Ele pode ser utilizado para simular as cheias de eventos de curta e longa duração. A estimativa das perdas nas precipitações é fundamental para a avaliação das cheias. O HMS dispõe de vários modelos para determinar a chuva efetiva. Após a retirada das perdas da chuva total e a obtenção da chuva excedente, parte-se para a transformação do hietograma de uma dada chuva em hidrograma efluente da bacia hidrográfica em estudo, essa transformação pode ser calculada por vários métodos, sendo o método do hidrograma unitário o mais aplicado na simulação de bacias hidrográficas.

Este trabalho tem por objetivo desenvolver uma pesquisa de comparação entre combinações de modelos de perdas e transformação, de forma a encontrar quais modelos são mais precisos na estimativa das vazões efluentes. Foram feitas quatro simulações utilizando o programa HEC-HMS com dados de precipitação e vazão observados na Microbacia Hidrográfica do São José (MHSJ) em um período de chuva intensa. Os modelos de transformação da chuva total em chuva efetiva (infiltração) utilizados foram: *Green and Ampt* e *SCS Curve Number*. Já os modelos utilizados na transformação da chuva em vazão foram: *Clark Unit Hydrograph* e *SCS Unit Hydrograph*.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1 Área de estudo

A Microbacia Hidrográfica do São José (MHSJ) possui área de aproximadamente 40 km<sup>2</sup> e está inserida na Sub-bacia do Salgado. Em sua extensão congregando áreas pertencentes aos principais municípios da região metropolitana do Cariri (Crato, Juazeiro do Norte e Barbalha), Sul do Ceará, Brasil (FIGURA 4), a MHSJ é composta por cursos d'água que se originam na encosta da chapada do Araripe e se espriam no vale do Cariri. O vale tem como uma de suas principais características a ocorrência significativa de águas subterrâneas. Uma extensão com cerca 2,0 km do rio principal é perenizado por contribuições do aquífero aflorante no vale do Cariri (FONTENELE, 2010).

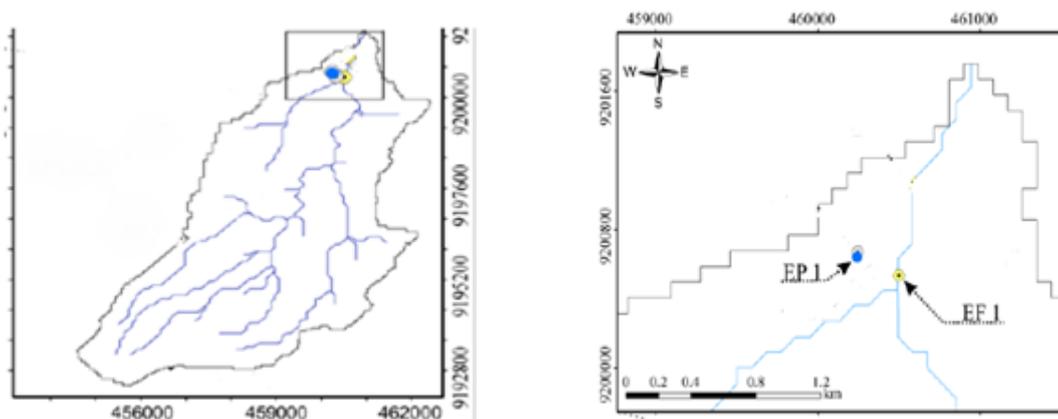


Figura 1 – Localização da MHSJ

### 2.2 Modelos de infiltração

#### 2.2.1 SCS Curve Number

O método SCS foi desenvolvido na década de 70 pelo Serviço de Conservação de Solos dos EUA. Esse método consiste na estimativa da chuva excedente como uma função da precipitação acumulada e da cobertura do solo, do uso da terra e da umidade antecedente, de acordo com as equações seguintes (Campos, 2009):

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad \text{para } P > I_a \quad 2.2.1$$

$$P_e = 0 \quad \text{para } P < I_a \quad 2.2.2$$

Em que:  $P_e$  é o escoamento superficial (mm);  $P$  é a altura total da chuva (mm);  $I_a$  é a abstração inicial (mm);  $S$  = retenção potencial máxima.

Com base em estudos experimentais de bacias, o SCS desenvolveu uma equação empírica para estimar  $S$  em função de  $I_a$ . A partir dessa equação pode-se escrever a equação da chuva excedente da seguinte forma:

$$P_e = \frac{(P - 0,2S)^2}{P + 0,8S} \quad 2.2.3$$

Estabeleceu-se então uma relação empírica com o CN, o qual consiste numa função do tipo da cobertura vegetal e do solo disposto em tabelas, a fim de se determinar o valor de  $S$ . O  $S$  é determinado através da equação:

$$S = \frac{25400 - 254CN}{CN} \quad 2.2.4$$

Em que:  $S$  = retenção potencial máxima pelos solos após o início do escoamento (mm) e  $CN$  = número de escoamento, que é determinado através de tabelas como dito anteriormente.

## 2.2.2 Green and Ampt

O modelo de Green & Ampt é um modelo conceitual utilizado no HEC-HMS para calcular a infiltração em uma bacia hidrográfica. Os parâmetros necessários neste método são a condutividade hidráulica, o potencial mátrico e as características de umidade do solo. (SARDOII; ROSTAMI; SIGAROUDI e TAHERI, 2012).

O modelo de infiltração idealizado por Green and Ampt (1911) descreve o processo de avanço de uma frente de molhamento ao longo do tempo. Essa frente separa o solo saturado do solo não saturado. (COLLISCHONN; DORNE, 2013).

Em resumo, o modelo calcula a perda de precipitação por infiltração na área permeável em um intervalo de tempo através da equação (1):

$$f_t = K \left[ 1 + \frac{(\theta - \theta_i) \psi}{F_t} \right] \quad 2.2.5$$

Em que:  $\psi$ : potencial mátrico do solo (mm);  $f_t$ : taxa de infiltração (mm/h);  $K$ : condutividade hidráulica (mm/h);  $F_t$ : lâmina total infiltrada desde o início do processo (mm);  $(\theta - \theta_i)$ : déficit inicial de umidade do solo em relação à saturação (adimensional).

Existem tabelas na literatura que mostram alguns valores usualmente empregados para esses parâmetros.

## 2.3 Modelos de escoamento

### 2.3.1 SCS Unit Hydrograph

Segundo Chase e Meadows (1998), pode-se estimar a forma do hidrograma a partir do hietograma. Quanto maior a inclinação da curva do hietograma, maior será a intensidade da chuva e,

portanto, maior será a vazão de pico, resultando em um hidrograma mais pontiagudo. Uma curva mais achatada do hietograma, com menores inclinações, indica uma chuva de menor intensidade, com uma vazão de pico menor, resultando em um hidrograma mais arredondado.

Um dos métodos mais simples e mais utilizados para estimar o volume de escoamento superficial resultante de um evento de chuva é o método desenvolvido pelo Soil Conservation Service (SCS). Está baseado no conceito de Hidrograma Unitário (HU) que é típico para cada bacia. O HU pode ser definido como o hidrograma resultante de um escoamento superficial de 1 cm de uma chuva com uma determinada duração. Na prática para se obter o HU é necessário a análise das precipitações e vazões daquela bacia em estudo. Como usualmente não temos estes dados, o que fazemos é usar fórmulas empíricas, quando então teremos o que chamamos de hidrograma sintético. No hidrograma sintético é determinada a vazão de pico e a forma do hidrograma baseado em um triângulo tendo as características físicas da bacia.

Segundo Campos (2009), o SCS desenvolveu um HU adimensional para o qual a ordenada da vazão no instante  $i$  é expressa pela razão entre a vazão  $q$  e a vazão de pico  $q_p$  em função da razão entre o tempo  $t$  e o tempo no qual ocorre a vazão de pico ( $t_p$ ).

As características físicas das bacias hidrográficas são incorporadas ao modelo pelos parâmetros: área da bacia ( $A$ ), tempo até o pico  $t_p$ , vazão de pico  $q_p$ , tempo de concentração ( $t_c$ ), e tempo de retardo ( $lag$ )  $t_L$ .

Os parâmetros do modelo são a área da bacia e o tempo de concentração, os demais são calculados pelas equações desenvolvidas pelo SCS.

- a) Com o valor de  $t_c$ , estima-se o tempo de retardo (*lag*)  $t_L$  pela relação:

$$t_L = 0,6t_c \quad 2.2.6$$

- b) Estima-se o valor do tempo até o pico ( $t_p$ ) em função do intervalo de cálculo:

$$t_p = \frac{\Delta t}{2} + t_L \quad 2.2.7$$

Em que:  $\Delta t$  denota o intervalo de tempo de cálculo e  $t_L$  o tempo de lag da bacia hidrográfica.

- c) Calcula-se a vazão de pico pela fórmula:

$$q_p = \frac{2,08A}{t_p} \quad 2.2.8$$

Dessa forma, conhecendo-se a vazão de pico  $q_p$  e o tempo onde acontece o pico pode-se obter as ordenadas do HU.

Foi-se então estimado os hidrogramas a partir dos hietogramas, através do método do hidrograma unitário do SCS (*SCS Unit Hydrograph*).

### 2.3.2 Clark

O método de Clark deriva o HU através da representação de dois processos que ocorrem na bacia (USACE, 2000):

- **Translação:** movimento da precipitação efetiva do local de origem até o exutório. É incorporada através do histograma tempo-área (HTA) que relaciona o tempo médio de viagem dos pontos da bacia para o exutório.

- **Atenuação:** redução da vazão de pico devido a acumulação que ocorre ao longo da bacia. É incorporada através de um reservatório linear com coeficiente  $K$ .

#### Conservação da massa / Continuidade

Considerando o princípio da conservação da massa aplicado para toda a bacia, tem-se que:

$$\frac{dS_t}{dt} = I_t - O_t \quad 2.2.9$$

Em que  $S_t$  é o volume armazenado,  $I_t$  é a vazão de entrada e  $O_t$  é a vazão de saída.

Supondo uma relação linear entre o armazenamento e a vazão de saída na bacia, tem-se que:

$$S_t = K O_t \quad 2.2.10$$

Além disso, a vazão de entrada  $I_t$  irá depender da área de contribuição para o exutório da bacia no tempo  $t$ . Isso é incorporado através de uma relação entre área de contribuição e tempo de simulação, da seguinte forma:

$$I_t = \frac{A_t \cdot P e_t}{\Delta t} \quad 2.2.11$$

Em que  $P e_t$  é a precipitação efetiva e  $\Delta t$  é o intervalo de tempo.

Substituindo na equação anterior:

$$K \frac{dO_t}{dt} = I_t - O_t \quad 2.2.12$$

Aproximando essa equação diferencial por diferença finitas e resolvendo para  $O_t$ , tem-se que:

$$O_t = C I_t + (1 - C) O_{t-1} \quad 2.2.13$$

$$C = \frac{\Delta t}{R + 0,5 \cdot \Delta t} \quad 2.2.14$$

Esse é a equação utilizada para calcular as vazões de saída no modelo de Clark.

## 2.4 Método de comparação

O coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe foi utilizado para avaliar a eficiência dos modelos, uma vez que é um dos mais importantes critérios estatísticos para avaliar o ajuste de modelos hidrológicos. Conforme Silva et al. (2008), quando o valor de NASH resultar maior que 0,75, o desempenho do modelo é considerado bom. Para valores de NASH entre 0,36 e 0,75, o desempenho é considerado aceitável, enquanto valores inferiores a 0,36 fazem com que o modelo seja julgado como inaceitável.

## 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 3.1 Parâmetros utilizados nos modelos de escoamento e infiltração

A Tabela 01 mostra os valores que foram utilizados na modelagem para cada método aplicado.

Tabela 01: Parâmetros inseridos no HEC-HMS para a Microbacia São José.

Modelo / Parâmetro	Umidade inicial (%)	Porosidade	Sucção (mm)	C. hidráulica - K - (mm/h)	CN	Tempo de retardo (min)	Coef. de armazen. (h)	tc (h)
Green & ampt	0.048	0.4	107.93	10	-	-	-	-
SCS CN	-	-	-	-	74	-	-	-
SCS UH	-	-	-	-	-	189	-	-
Clark	-	-	-	-	-	-	4.96	5.25

A maioria dos dados foi obtida através de estudos realizados por Oliveira Júnior (2015) e Fontenele (2015) na Microbacia São José. Outros, foram retirados de tabelas existentes na literatura.

### 3.2 Eventos de precipitação e vazão estudados

Para a simulação foi considerado um evento de precipitação que ocorreu na bacia no dia 04 de março de 2010 no horário de 06 :47 às 08:53. Essa precipitação foi calculada através da aplicação do método de Thiessen com os valores de três postos de medição localizados no interior da bacia.

#### 3.2.1 Combinação 01: SCS Curve Number e SCS Unit Hydrograph

A Figura 2 mostra o hidrograma observado em azul e o calculado em vermelho. O programa HEC-HMS, através da função objetivo Nash-Sutcliffe, otimizou o parâmetro CN, com valor inicial de 74, para 99. Isso mostra que a chuva é pouca para o escoamento, uma vez que o volume precipitado total foi de 38 mm, enquanto que o volume observado total do escoamento foi de 39,48 mm. O alto valor de CN após a otimização, tendo-se em vista que o valor máximo desse parâmetro é 99, ocorre justamente porque o programa HEC-HMS tenta ajustar o volume precipitado e volume escoado, a fim de compatibilizar a simulação com os dados observados, já que, normalmente, não se pode ter um valor escoado maior que precipitado. Pode-se supor que ocorreu *overfitting* dos dados de vazão observados, que são desvios causados por erros de medição ou fatores aleatórios. O tempo de retardo do método de transformação da chuva em vazão foi pouco alterado, passando da estimativa inicial de 189min, para 146,26min após a otimização.

A vazão de pico dos dois hidrogramas se distanciaram em quase 38%, porém ocorreram praticamente no mesmo horário com uma diferença de apenas 1 minutos. O coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe obtido foi 0,8; mostrando que o desempenho do modelo é considerado bom.

#### 3.2.2 Combinação 02: Green and ampt + Clark Unit Hydrograph

A Figura 3 mostra o hidrograma observado em azul e o calculado em vermelho. A otimização diminuiu bastante a condutividade do solo no modelo *Green and Ampt* (passando de 10mm/h para 0,01mm/h), e o coeficiente de armazenamento do modelo *Clark Unit Hydrograph* (passando de 4,96h para 0,98h). A condutividade do solo foi otimizada para um valor compatível com um solo argiloso, mais impermeável, causando maior escoamento superficial. Esse ajuste foi necessário por conta da incompatibilidade entre o volume precipitado e o escoado, citado na análise anterior. O coeficiente de armazenamento foi reduzido para compatibilizar as vazões de pico, indicando que a estimativa inicial estava alta para capacidade de amortecimento da bacia. Nos demais parâmetros analisados não houve variação significativa na otimização, que são: Sucção no método *Green and Ampt* (valor inicial 107mm, para o valor otimizado de 99.44mm) e o tempo de concentração no método de *Clark Unit Hydrograph* (valor inicial 5,25h para o valor otimizado de 3,7h).

A vazão de pico dos dois hidrogramas se distanciaram em quase 37%, porém ocorreram praticamente no mesmo horário com uma diferença de apenas 9 minutos. O coeficiente de eficiência Nash-Sutcliffe obtido foi 0,82; mostrando que o desempenho do modelo é considerado bom.

#### 3.2.3 Combinação 03: Green and ampt + SCS Unit Hydrograph

A Figura 4 mostra um gráfico de comparação entre o hidrograma observado (azul) e o calculado (vermelho). Nota-se claramente uma diferença maior dos valores antes do pico dos hidrogramas, onde o hidrograma observado apresenta um valor máximo local de vazão, o que não é observado no hidrograma simulado.

Nessa combinação foram otimizados quatro parâmetros do método *Green and ampt* e um parâmetro do método *SCS Unit Hydrograph*. Pode-se perceber que a condutividade hidráulica diminuiu drasticamente (passando de 10mm/h para 0,01mm/h) enquanto a umidade inicial do solo aumentou (passando de 0,048 para 0,5). Essas características proporcionam um maior escoamento superficial, já que o solo possui baixa condutividade e uma umidade inicial maior. Isso pode ser explicado devido a necessidade de aumentar o escoamento superficial para que as vazões simuladas pudessem alcançar as observadas, como já foi discutido anteriormente. A porosidade (valor inicial: 0,4 – valor otimizado: 0,39) se manteve praticamente a mesma; a sucção (valor inicial: 107,93mm – valor otimizado: 85,66mm) e o tempo de retardo (valor inicial: 189min – valor otimizado: 139,79min) também variaram pouco.

A vazão de pico dos dois hidrogramas se distanciaram em quase 50%, porém ocorreram praticamente no mesmo horário com uma diferença de apenas 6 minutos. O coeficiente de NASH resultou no valor de 0,65, o que revela que o desempenho do modelo foi considerado aceitável, mas não muito adequado.

### 3.2.4 Combinação 04: SCS Curve Number + Clark Unit Hydrograph

Observa-se que programa HEC-HMS, através do processo otimização, elevou o valor do parâmetro CN que possuía inicialmente o valor de 74, para 99. Tal fato pode ser explicado por conta do volume precipitado ser menor que o volume total escoado, como já foi explicado nas análises anteriores. A otimização dos dados referentes ao método *Clark Unit Hydrograph* se deu pela diminuição dos valores de tempo de concentração (passando de 5,25h para 3h) e coeficiente de armazenamento (passando de 4,96h para 1h).

De acordo com o Figura 5, as vazões de pico dos hidrogramas, observado (azul) e calculado (vermelho), se distanciaram em torno de 50%, apresentando um valor considerável de discrepância, porém ocorreram exatamente no mesmo horário. O coeficiente de Nash-Sutcliffe resultou no valor de 0,625, o que revela que o desempenho do modelo foi considerado aceitável, mas não muito adequado.

### 3.3 Comparação dos Hidrogramas

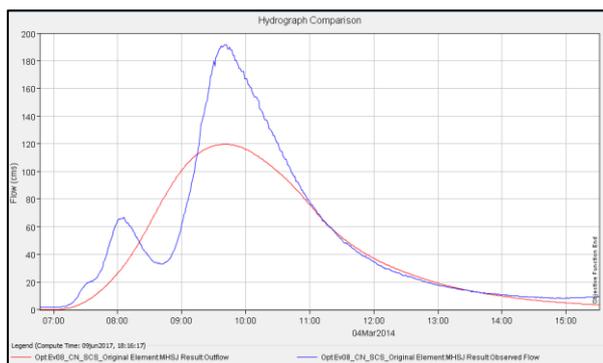


Figura 2 - Comparação entre o Hidrograma observado e o calculado – Combinação 1 (*SCS Curve Number e SCS Unit Hydrograph*).

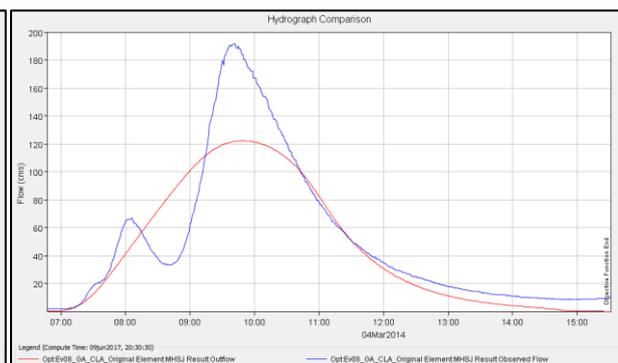


Figura 3 - Comparação entre o Hidrograma observado e o calculado – Combinação 2 (*Green and Ampt e Clark Unit Hydrograph*).

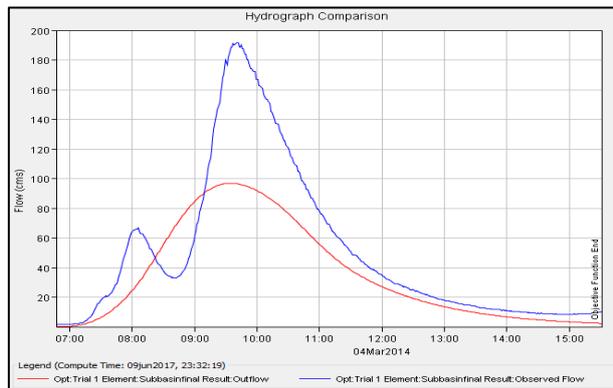


Figura 4 - Comparação entre o Hidrograma observado e o calculado – Combinação 3 (*Green and ampt + SCS Unit Hydrograph*).

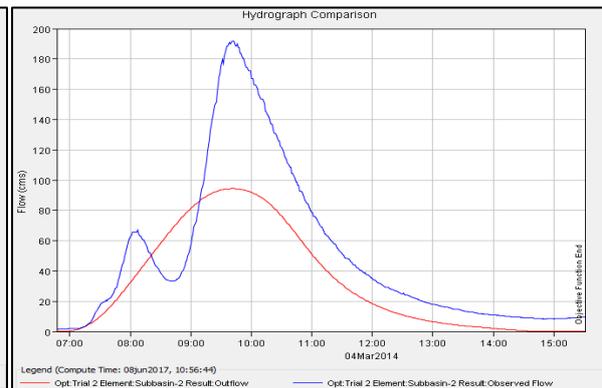


Figura 5 - Comparação entre o Hidrograma observado e o calculado – Combinação 4 (*SCS Curve Number + Clark Unit Hydrograph*).

#### 4. CONCLUSÃO

Através das simulações pode-se perceber que a combinação 1 (clássica), dos métodos desenvolvidos por SCS (*SCS Curve Number* e *SCS Unit Hydrograph*), juntamente com a combinação 2 (*Green and Ampt* e *Clark Unit Hydrograph*), apresentaram coeficiente de eficiência Nash com valores bem próximos e os maiores das quatro combinações, em torno de 0,8, demonstrando o bom desempenho desses modelos. Já as demais combinações resultaram em um Nash menor, em torno de 0,65, mostrando um desempenho aceitável, entretanto menos eficiente.

#### REFERÊNCIAS

CAMPOS, J. N. B. **Lições em modelos e simulação hidrológica**. Fortaleza 2009 ASTEF/EXPRESSION GRÁFICA 166..il.

USACE. **Hydrologic Modeling System HEC-HMS Technical Reference Manual**. 2000.

CHASE, D. V.; MEADOWS, M. **Essential Hydraulics and Hydrology – Interpreting SCS 24-hour Storms**. Watertown-CT, USA: Haestad Press. 1998.

OLIVEIRA JÚNIOR, Antonio Italcly de. **UTILIZAÇÃO DA ANÁLISE MULTIVARIADA NA CARACTERIZAÇÃO DOS SOLOS DA MICROBACIA HIDROGRÁFICA DO SÃO JOSÉ NO CARIRI CEARENSE**. 2015. 58 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Juazeiro do Norte, 2015.

FONTENELE, Sávio de Brito. **TROCAS HÍDRICAS ENTRE RIO E AQUIFERO EM REGIÕES DO SEMIÁRIDO HIDROGEOLOGICAMENTE DISTINTAS**. 2015. 156 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

COLLISCHONN, Walter; DORNELLES, Fernando. **Hidrologia para ciências e engenharia**. Porto Alegre: Cd.g, 2013. 335 p.

SARDOII, Elham Rafiei et al. Calibration of loss estimation methods in HEC-HMS for simulation of surface runoff (Case Study: Amirkabir Dam Watershed, Iran). **Advances In Environmental Biology**, v. 1, n. 6, p.343-348, 2012.

SILVA, P.M.O.; MELLO, C.R.; SILVA, A.M. & COELHO, G. Modelagem da hidrografia de cheia em uma bacia hidrográfica da região Alto Rio Grande. **R. Bras. Eng. Agric. Amb.**, 2008.