

Avaliação da acurácia dos métodos do SCS para cálculo da precipitação efetiva e hidrogramas de cheia

Evaluation of the SCS method for effective rainfall and flood hydrograph estimation

Stéphanie Fernandes Cunha, Francisco Eustáquio Oliveira e Silva, Tainá Ulhoa Mota e Mário Cicareli Pinheiro

Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil

stephaniefernandesc@hotmail.com; fcoeustaquio@gmail.com; tainamota@uol.com.br; mario.cicareli@potamos.com.br

Recebido: 13/03/15 - Revisado: 04/05/15 - Aceito: 29/06/15

RESUMO

No Brasil, o método do SCS é tradicionalmente utilizado como modelo hidrológico de chuva-vazão. Entretanto, esse modelo foi formulado para bacias com características específicas de porte, tipos, usos e manejo do solo. O emprego generalizado do método SCS-CN, com base em valores de referência do parâmetro CN, tem conduzido a estimativas de vazões de cheia consideradas superestimadas por experientes engenheiros de recursos hídricos. Nesse contexto, este trabalho avaliou e comparou a precipitação efetiva e os hidrogramas de cheia de projeto resultantes da aplicação da metodologia do SCS com eventos de chuva e vazão observados na bacia do ribeirão Serra Azul, Minas Gerais. Para tal, a bacia foi modelada segundo dois cenários. No primeiro, utilizou-se a metodologia do SCS para cálculo da precipitação efetiva, considerando o CN fornecido pelas tabelas do SCS, e o hidrograma unitário sintético proposto pela mesma instituição. No segundo cenário, aplicou-se a precipitação efetiva considerando valores de CN calibrados a partir de sua variação com a altura de chuva, e o hidrograma unitário derivado a partir de dados linigráficos. Finalmente os eventos simulados foram comparados com os dados observados. Os resultados indicam que o método do SCS tende a superestimar o volume escoado e as vazões de pico, principalmente para eventos de maior magnitude, que são normalmente adotados nas condições de projeto. Em compensação, o modelo ajustado para cálculo do CN em função da chuva combinado com o hidrograma unitário médio da bacia forneceu resultados com menor erro percentual em relação aos eventos monitorados.

Palavras Chave: SCS Curve Number. Método de ajuste assintótico. Hidrograma unitário

ABSTRACT

The SCS rainfall-runoff relation is commonly applied in Brazil as an indirect rainfall-runoff model. However, this model was originally developed for specific physical basin characteristics. The generalized usage of the SCS rainfall-runoff relation based on reference values of the CN parameter, has led to overestimated design peak discharges, according to the observation of experienced water resources engineers. This paper evaluates and compares the effective precipitation and discharge hydrographs calculated by the SCS method with monitored data in the drainage area of a stream called Serra Azul, in Minas Gerais. To achieve this, the basin was modeled according to the SCS method for computation of the excess precipitation and the SCS synthetic unit hydrograph for transformation. Similarly, the basin was modeled using the basin calibrated CN as a function of rainfall and the observed average unit hydrograph. The results suggest that the SCS method overestimates the runoff and peak discharge, mostly for high precipitation events. On the other hand, the calibrated CN and average unit hydrograph resulted in a smaller percentage error than the SCS method results.

Keywords: SCS Curve Number. Asymptotic Fitting Method. Unit Hydrograph

INTRODUÇÃO

O dimensionamento de estruturas hidráulicas deve ser embasado em um minucioso estudo hidrológico, visando a obtenção de vazões de projeto para determinados períodos de retorno que garantam a operação eficiente e a segurança hidráulica da obra. Nesse caso, o hidrograma da cheia de projeto pode ser determinado por métodos diretos, os quais utilizam dados fluviométricos, ou por métodos indiretos, representados por modelos hidrológicos que transformam a chuva de projeto em vazão de projeto. Na ausência de dados fluviométricos, situação comum nas pequenas bacias hidrográficas do Brasil, são utilizados modelos hidrológicos calibrados para outras bacias ou baseados em parâmetros tabelados para diferentes características físicas levantadas na área de interesse.

Em geral, para obtenção do hidrograma da cheia de projeto, aplica-se um método para cálculo da precipitação efetiva seguido de uma função de transferência, também denominada hidrograma unitário, que permite a distribuição temporal do volume total de chuva efetiva. Um método comumente aplicado para determinação da precipitação efetiva é o método desenvolvido pelo SCS – Soil Conservation Service (atual NRCS – Natural Resources Conservation Service). O modelo tem como principal parâmetro o CN (Curve Number), que depende da classificação hidrológica do solo, das condições antecedentes de umidade e da cobertura do solo. A função de transferência usualmente aplicada é o hidrograma unitário sintético desenvolvido pela mesma instituição para a síntese de hidrogramas unitários em bacias sem monitoramento hidrométrico. As variáveis de entrada da função são o intervalo de discretização da chuva, o tempo de resposta e a área da bacia.

Apesar da simplicidade, praticidade e consequente aceitação do método, existem diversas críticas e dúvidas em relação à sua generalização. É comum a sua aplicação para bacias com características diferentes daquelas onde foram executados os estudos que deram origem ao modelo, bem como para finalidades que diferem da proposta original. Tais observações e questionamentos são manifestos por pesquisadores como Chow, Maidment e Mays (1988), Garen e Moore (2005), Hawkins et al. (2009), Mullem et al. (2002), Ponce e Hawkins (1996), Stewart, Canfield e Hawkins (2012) e Tedela et al. (2012). Ademais, profissionais da área de recursos hídricos no Brasil têm observado que a aplicação deste modelo tem resultado no superdimensionamento de obras hidráulicas, sendo estas pouco condizentes com a escala das bacias e com a observação das enchentes locais.

Considerando a demanda por soluções que promovam a redução das incertezas associadas ao cálculo de vazões de projeto por métodos indiretos, a proposta deste artigo é avaliar a acurácia do método do SCS. Especificamente, o objetivo deste trabalho é (i) comparar as precipitações efetivas resultantes da aplicação do CN ponderado calculado por meio das tabelas do SCS e os resultantes da aplicação do CN calibrado através de dados monitorados; (ii) comparar o hidrograma unitário sintético do SCS com o derivado a partir de eventos observados; (iii) avaliar a exatidão dos hidrogramas simulados pela aplicação do modelo original e do calibrado. Tais análises foram viabilizadas

pela existência de cerca de 10 anos de registro de dados linigráficos e pluviográficos na sub-bacia do ribeirão Serra Azul, a qual integra a bacia representativa de Juatuba – MG.

MÉTODO SCS-CN

A relação funcional mais empregada para estimação do escoamento superficial em bacias não monitoradas é o método do Número de Curva (CN) desenvolvido pelo U.S. Department of Agriculture (USDA) Soil Conservation Service (SCS). O método é documentado no National Engineering Handbook (NEH), Part 630: Hydrology e foi publicado pela primeira vez em 1954, sendo então seguido de diversas revisões. Esse modelo chuva-vazão é largamente aceito por sua simplicidade, número limitado de parâmetros e autoridade da instituição de origem (PONCE; HAWKINS, 1996).

De acordo com a documentação do método, seu desenvolvimento foi fruto de uma série de investigações na primeira metade do século 20, sobretudo na década de 1940. Tais investigações se deram principalmente por meio de experiências de campo em pequenas bacias rurais na região centro-oeste dos EUA. Porém, ao longo dos anos, o método SCS-CN tornou-se consagrado na prática cotidiana da engenharia de recursos hídricos e teve a gama de suas aplicações estendida a condições e contornos muito diversos daqueles empregados em sua concepção e formulação iniciais.

O método do SCS assume que, em uma dada bacia hidrográfica, ao longo da duração de um episódio de chuva, são iguais o quociente do volume instantâneo de escoamento direto (Q) pelo volume total de chuva (P), e o quociente do volume de infiltração (F), acumulado até aquele instante, pelo volume máximo potencial de retenção (S). Tal relação é explicitada na Equação 1 que se segue.

$$\frac{F}{S} = \frac{Q}{P} \quad (1)$$

Quando a perda inicial (I_a) é diferente de zero, o volume de chuva disponível para escoar superficialmente é (P-I_a). Logo, tem-se a seguinte relação:

$$\frac{F}{S} = \frac{Q}{P-I_a} \quad (2)$$

E da equação da continuidade, segue-se que:

$$P = I_a + F + Q \quad (3)$$

A combinação das equações 2 e 3 dá origem à equação de escoamento superficial do método SCS-CN:

$$Q = \frac{(P-I_a)^2}{(P-I_a)+S} \quad (4)$$

A retenção potencial máxima (S), também denominada índice de armazenamento ou perdas máximas potenciais, é uma medida da resposta hidrológica potencial da bacia. Apesar de ser relacionada com as características do solo e de sua cobertura, S

não é uma propriedade física identificável, ou seja, é constante apenas para uma precipitação particular (MULLEM et al., 2002). Esta variável é transformada em CN através de uma identidade arbitrária (Equação 5). O CN varia de 0 a 100 correspondendo a $S = \infty$ e $S = 0$, respectivamente.

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (5)$$

O capítulo 9 do NEH (NRCS, 2004) fornece tabelas com valores de CN em função do uso e cobertura do solo, classificação hidrológica do solo e condição antecedente de umidade. Os valores encontrados nestas tabelas vêm sendo aplicados em diversas bacias dos EUA e do mundo. Porém uma das ressalvas apresentadas por Ponce e Hawkins (1996) é o fato de o método ter sido desenvolvido utilizando dados de uma região restrita, e, por consequência, recomenda-se cuidado no uso destes valores em outras regiões climáticas e geográficas e ainda estudos locais para determinação dos valores de CN.

A condição antecedente de umidade (AMC) na versão atual do NEH é denominada condição antecedente de escoamento superficial (ARC). As condições antecedentes de umidade são divididas em: baixa umidade (ARC I); condições médias (ARC II); e alta umidade (ARC III). Em versões anteriores do NEH é fornecida uma tabela que relaciona a AMC com a chuva nos 5 dias antecedentes ao evento de cheia. Contudo o NRCS reconheceu problemas com esta tabela e Hjelmfelt (1991) demonstrou que não há correlação entre a retenção potencial máxima e a chuva nos 5 dias antecedentes. Portanto a aplicação da mesma para determinação da condição antecedente de umidade não é indicada (HAWKINS et al., 2009).

A perda inicial (I_a) consiste principalmente em interceptação, infiltração incipiente a partir do início da chuva e armazenamento superficial. O método do SCS calcula I_a baseado na Equação 6, onde o valor de λ é fixado como 0,2.

$$I_a = \lambda S \quad (6)$$

O uso desta relação é vantajoso pela redução no número de parâmetros do modelo. Porém, sua aplicação tem sido questionada e acredita-se que uma relação simples e que descreva a realidade não possa ser encontrada (HJELMFELT, 1991), visto que muitos fatores físicos da bacia e características do evento de chuva interagem para determinar a perda inicial. De acordo com Ponce e Hawkins (1996), o valor de λ pode ser interpretado como um parâmetro regional para representar a resposta do método às diversidades geológicas e climáticas. Ademais, outros autores (ELHAKEEN; PAPANICOLAOU, 2009), verificaram que I_a não é linearmente proporcional à máxima retenção potencial.

Em resumo, as críticas e inconsistências apresentadas ao longo do tempo por pesquisadores são apresentadas a seguir. As seguintes são listadas por Ponce e Hawkins (1996):

1. O método foi originalmente desenvolvido com dados regionais da região centro-oeste dos EUA. Ele foi então estendido a outras regiões dos EUA e de outros países sem as devidas adaptações nas tabelas de CN.
2. O método é muito sensível à escolha do CN e à condição

antecedente de umidade, especialmente para baixos valores de CN e/ou alturas de chuva, o que reflete uma variação natural. Contudo, há uma falta de diretrizes claras sobre como variar a condição antecedente.

3. A intenção inicial do método era estimar o escoamento superficial em áreas agrícolas, e por isso tem melhor desempenho em tais áreas. Posteriormente, sua aplicação foi estendida a áreas urbanas. O método não tem bom desempenho em áreas florestais, o que significa que o SCS-CN se adapta melhor em cursos d'água com escoamento de base insignificante, o que geralmente ocorre em rios de primeira e segunda ordem em regiões subúmidas e úmidas, e em rios efêmeros em regiões áridas e semiáridas.
4. O método não considera efeitos de escala espacial. Alguns autores constataram que o CN tende a decrescer com o aumento da área de drenagem, refletindo o papel das perdas nas transmissões em canais em regiões semiáridas. Na falta de diretrizes sobre sua aplicação, assume-se que o SCS-CN seja aplicado a bacias com menos de 250 km², a não ser que exista uma subdivisão de bacias associada a uma rede de canais naturais.
5. O método fixa o coeficiente de perda inicial como 0,2, mas este deveria ser interpretado como um parâmetro regional. Outros autores ainda acrescentam:
6. A perda inicial não é linearmente proporcional à retenção potencial máxima (ELHAKEEN; PAPANICOLAOU, 2009; JAIN et al., 2006).
7. Não é conhecida a amplitude de períodos de retorno associados às cheias empregadas para tabular os valores de CN, portanto não se sabe até quais magnitudes o modelo é aplicável (MISHRA; SURESH BABU; SINGH, 2007).
8. Do ponto de vista de sua estrutura conceitual, Chow, Maidment e Mays (1988) apontam uma crítica referente ao comportamento temporal da curva de infiltração, implícita na formulação do método. Quando as equações (2) e (3) são combinadas e derivadas em relação ao tempo, considerando que I_a e S são constantes, obtém-se:

$$\frac{dF}{dt} = \frac{S^2 dP/dt}{(P - I_a + S)^2} \quad (7)$$

Na Equação 7, quando $P \rightarrow \infty$, $dF/dt \rightarrow 0$, como esperado. No entanto, quando dP/dt (intensidade da precipitação) aumenta, a taxa de infiltração aumenta proporcionalmente, o que não possui sentido físico, quando comparado à teoria da infiltração.

9. O fato de o método não se comportar como uma equação de infiltração indica que o modelo é inadequado para o cálculo do hietograma da precipitação efetiva (HJELMFELT, 1991). De acordo com o mesmo autor, a utilização da equação de escoamento superficial do SCS-CN com essa finalidade se deve mais à falta de um método melhor do que à confiança no processo. O método, como afirmado por Hawkins et al. (2009), foi desenvolvido para cálculo da precipitação efetiva total, ou seja, o modelo é um integrador de todas as perdas causadas por todos os processos que ocorrem na bacia durante o evento.

As várias críticas e reparos ao modelo SCS-CN motivaram, ao longo dos anos, o aparecimento de diversas propostas de alterações da formulação original. Uma extensa lista de propostas é compilada na revisão crítica de Mishra, Suresh Babu e Singh (2007). A edição especial do Journal of Hydrologic Engineering editada por Mishra, Pandey e Singh (2012) também apresenta uma série de artigos com foco no método SCS-CN e suas aplicações convencionais, além dos avanços recentes incorporando variáveis tais como tempo, intensidade de precipitação e infiltração.

Dentre os diversos estudos existentes sobre o método, foi aplicado neste trabalho o método de calibração do CN proposto por Hawkins (1993). A partir de pares chuva-vazão (P:Q) monitorados, o autor verificou que o CN varia com a altura de chuva, e, na maioria dos casos, apresenta um decaimento aproximando um valor constante para maiores alturas, o qual é tomado como um valor representativo do parâmetro. Equações assintóticas foram então ajustadas de modo a aproximar o valor limite de CN. Esse valor constante é considerado o melhor ajuste de CN para a bacia. Esta metodologia de calibração do valor do CN é denominada Método do Ajuste Assintótico, e tem sido adotada como procedimento padrão pelo Curve Number Work Group para determinação do CN a partir de dados locais (MULLEM et al., 2002).

Aplicando o método do ajuste assintótico, Hawkins (1993) descreveu três comportamentos do CN. O primeiro e mais frequente é o comportamento padrão, no qual o CN apresenta declínio com o aumento da altura de chuva aproximando um valor constante (assintótico), para elevadas alturas de precipitação. Em casos menos comuns, o CN declina continuamente com o aumento da altura de chuva, sem tendência de aproximação de um valor constante, sendo este denominado comportamento complacente. No último caso, pouco comum, o valor do CN aumenta abruptamente e aproxima um valor constante para maiores alturas, o que é chamado de comportamento abrupto.

Estudos mais recentes também observaram estes comportamentos do CN e avaliaram a precisão de valores tabelados com base no Método de Ajuste Assintótico. Como exemplo podem ser citados os trabalhos de D'Asaro, Grillone e Baíamonte (2012), Sartori (2010) e Tedela (2012).

HIDROGRAMA UNITÁRIO SINTÉTICO DO SCS

O hidrograma unitário (HU) representa o hidrograma de escoamento superficial correspondente à precipitação efetiva unitária de intensidade constante distribuída uniformemente sobre a área de drenagem. É um modelo linear concentrado simples utilizado como função de transferência de uma bacia hidrográfica para gerar hidrogramas de cheias correspondentes a precipitações efetivas de quaisquer magnitudes e durações (PINHEIRO, 2011). As suposições intrínsecas do modelo do hidrograma unitário listadas por Chow, Maidment e Mays (1988) são:

1. A precipitação efetiva tem intensidade constante durante sua duração.
2. A precipitação efetiva é distribuída uniformemente sobre

toda a bacia de drenagem.

3. O tempo de duração do escoamento superficial (tempo de base) resultante de uma precipitação efetiva de dada duração é constante.
4. As ordenadas do escoamento superficial de mesma duração em tempos correspondentes são diretamente proporcionais ao volume total escoado representado por cada hidrograma.
5. Para uma determinada bacia, o hidrograma resultante de uma dada precipitação efetiva reflete as características permanentes da bacia.

Os dados hidrológicos para elaboração de hidrogramas unitários devem ser cuidadosamente selecionados de forma que tais suposições sejam aproximadas. Na falta de dados hidrológicos são utilizados hidrogramas unitários sintéticos estabelecidos com base em dados de chuva-vazão de outras bacias.

O SCS possui um hidrograma unitário adimensional que foi desenvolvido por Mockus (1957). Este hidrograma possui forma curvilínea e é expresso por uma razão adimensional entre a vazão e a vazão de pico e entre o tempo e o tempo de pico. Os fatores vazão/vazão de pico e tempo/tempo de pico são fornecidos por tabelas disponíveis no NEH. O hidrograma curvilíneo pode ser aproximado por um hidrograma unitário triangular equivalente de mesmo volume. Isto permite que a base do triângulo seja resolvida em função do tempo de pico por geometria de triângulos. Desta forma, as seguintes equações são obtidas:

$$T_b = T_p + T_r = 2,67 \quad (8)$$

$$T_r = T_b - T_p = 1,67T_p \quad (9)$$

$$T_p = \frac{\Delta D}{2} + T_L \quad (10)$$

$$q_p = \frac{0,208A}{T_p} \quad (11)$$

onde:

T_b = Tempo de base do hidrograma triangular;
 T_r = Tempo de descida do hidrograma triangular;
 T_p = Tempo de pico do hidrograma triangular;
 T_L = Tempo de retardo do hidrograma triangular.
 ΔD = Duração da precipitação efetiva unitária;
 q_p = Vazão de pico unitária em $\text{m}^3/\text{s}.\text{mm}$;
 A = Área da bacia em km^2 .

O SCS relaciona o tempo de concentração (T_c) com o tempo de retardo (T_L) pela Equação 12.

$$T_c = \frac{5}{3}T_L \quad (12)$$

ou

$$T_L = 0,6T_c \quad (13)$$

Para cálculo do tempo de concentração existem diversas fórmulas empíricas criadas com dados de diferentes locais e para diferentes aplicações. Este é um parâmetro difícil de ser estabelecido considerando sua dependência das características

da bacia e da chuva, além das incertezas associadas às equações empíricas disponíveis. Silveira (2005) apresenta uma comparação das diversas fórmulas encontradas na literatura técnica. Uma fórmula comumente utilizada em projetos de engenharia é a de Kirpich (Equação 14), onde t_c corresponde ao tempo de concentração em horas, L ao comprimento do talvegue principal em km e S à declividade do talvegue em porcentagem.

$$T_c = 0,39 \left(\frac{L^2}{S} \right)^{0,385} \quad (14)$$

ÁREA DE ESTUDO

O presente estudo abrange a bacia hidrográfica definida pela estação fluviométrica Jardim (40511100) (Figura 1) no ribeirão Serra Azul, com área de drenagem de 113 km², situada a montante da barragem de Serra Azul da COPASA (Companhia de Saneamento de Minas Gerais). Essa estação é um dos pontos de monitoramento da Bacia Representativa de Juatuba, implantada pelo DNAEE (Departamento de Águas e Energia Elétrica) no início da década de 70, e assim denominada por possuir características típicas de uma vasta região localizada no centro de Minas Gerais, tais como vegetação, geologia, orografia e fácies ocupacionais (BRASIL, 1986). As estações de monitoramento pluvio-fluviométrico que continuam em operação produziram no ribeirão Serra Azul uma amostra de cerca de 10 anos de dados contínuos em durações subdiárias.

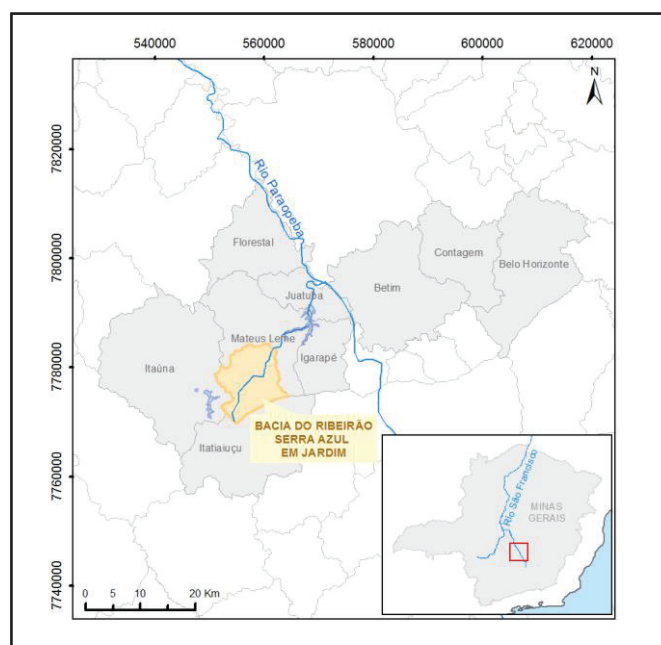


Figura 1 – Localização da bacia do ribeirão Serra Azul em Jardim. Datum SAD 69

O relevo na bacia do ribeirão Serra Azul apresenta-se em sua maioria variando entre ondulado a íngreme com declividade média de 14,65% e máxima de 82,14%. O perfil longitudinal obtido com base em cartas topográficas da GeoMINAS na escala 1:50.000 apresenta 22,4 km de comprimento do talvegue, desnível total de 412,9 m e declividade equivalente de 0,65%.

METODOLOGIA

Análise e seleção de eventos de chuva e vazão

Os dados de cotas utilizados neste estudo são provenientes da estação linigráfica Jardim (40511100), no ribeirão Serra Azul, e os dados pluviográficos foram obtidos nas estações listadas na tabela 1. Os registros utilizados estão compreendidos no período de 08/01/1997 a 28/05/2008. As séries históricas de dados linigráficos e pluviográficos foram concedidos pela CPRM (Serviço Geológico do Brasil) e consistidos tomando por referência os dados de cotas com duas leituras diárias e alturas diárias de precipitação disponibilizados pela ANA (Agência Nacional de Águas). As cotas linigráficas foram convertidas em vazão por meio das curvas-chave também disponibilizadas pela ANA. A chuva média sobre a bacia foi determinada pelo método dos polígonos de Thiessen.

Tabela 1 – Estações utilizadas neste estudo

Código	Nome	Tipo	UTM N	UTM E
2044021	Alto da Boa Vista	Plu.	7776717	562606
2044041	Fazenda Laranjeiras	Plu.	7777116	553867
2044052	Jardim	Plu.	7783422	561933
2044054	Serra Azul	Plu.	7778817	559884
40511100	Serra Azul	Flu.	7783153	561816

Para que houvesse uma padronização e maior agilidade no processo, o escoamento de base foi separado através da ferramenta WHAT (Web based Hydrograph Analysis Tool) descrito em Lim et al. (2005). O método selecionado neste trabalho foi o mínimo local, que consiste na ligação de mínimos locais através da comparação da declividade dos hidrogramas.

Foram selecionados ao todo 190 eventos para calibração do CN e simulação do modelo. Desses, foram escolhidos 58 eventos simples para a derivação do hidrograma unitário da bacia. O valor mínimo acumulado de precipitação utilizado como critério de seleção dos eventos foi 10 mm. O limite inferior da vazão de pico dos eventos selecionados foi em torno de 2 m³/s.

Estimação do CN da bacia pelo método do SCS

Os dois principais tipos de solo da bacia – LVd9 (Latosolos Vermelhos Distróficos e Argissolos Vermelho-Amarelos Distróficos) e PVAd9 (Argissolos Vermelho-Amarelos Distróficos e Cambissolos Háplicos Tb Distróficos) – foram classificados como tipo B a partir dos critérios propostos por Sartori (2010) para classificação hidrológica de solos brasileiros.

Para a elaboração do mapeamento do uso e ocupação do solo da bacia foi utilizada a composição de imagens do satélite Landsat 5-TM de 21 de setembro de 2011. As imagens são disponibilizadas no website do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE (<http://www.dgi.inpe.br/CDSR/> acesso em 12/02/2014). A identificação das classes de mapeamento foi realizada através das composições coloridas das bandas 4(R),

5(G) e 3(B). As classes utilizadas foram: Floresta Densa, Reflorestamento, Cerrado, Área Urbana, Agrícola/Pastagem, Solo Exposto, Área Degradada e Corpos d'água.

As classes de uso e ocupação do solo foram associadas às classes semelhantes disponíveis na tabela do SCS. O CN associado a cada classe foi selecionado considerando condição antecedente de escoamento II. O CN composto foi calculado a partir da média dos CNs ponderada pela porcentagem das áreas correspondentes.

Determinação do CN empírico pelo Método de Ajuste Assintótico

O CN foi calibrado pelo método introduzido por Hawkins (1993), que considera que o CN varia com a altura de chuva, e, na maioria dos casos, apresenta um decaimento aproximando um valor constante para maiores alturas, o qual é tomado como um valor representativo do parâmetro. O hidrograma unitário médio da bacia foi calculado a partir de eventos monitorados selecionados, e este, quando adimensionalizado, pôde ser comparado com o hidrograma unitário sintético do SCS.

A partir dos 190 eventos selecionados e da separação do escoamento de base, foram formados os pares P:Q (precipitação total : precipitação efetiva) naturais. Os dados foram ordenados formando pares P:Q de mesma frequência, conforme proposto pelo método. Para a estimação de S a partir de dados pluvio-fluviométricos monitorados, a Equação 15 é comumente utilizada (HAWKINS et al., 2009). Nessa equação, a perda inicial é considerada igual a 20% da retenção potencial máxima.

$$S = 5[P + 2Q - \sqrt{(4Q^2 + 5PQ)}] \quad (15)$$

Após a plotagem dos pares P:CN obtidos a partir dos pares P:Q foi verificado o tipo de comportamento da bacia. A Equação 16 apresenta o modelo analítico ajustado aos pares P:CN, que corresponde a bacias com comportamento do tipo padrão. O modelo foi ajustado para CN_{∞} e k. pelo método de mínimos quadrados.

$$CN(P) = CN_{\infty} + (100 - CN_{\infty})\exp(-kP) \quad (16)$$

Derivação do hidrograma unitário da bacia a partir de eventos monitorados

A partir dos 58 eventos simples selecionados e da separação do escoamento de base, foram obtidos os volumes correspondentes de escoamento superficial. Para cada evento, a precipitação efetiva foi então calculada a partir da divisão do volume de escoamento superficial pela área da bacia, com as devidas transformações de unidades.

As ordenadas do hidrograma unitário do evento em $m^3/s.mm$ foram calculadas pela divisão das ordenadas do hidrograma observado pela precipitação efetiva, seguindo o princípio da proporcionalidade. O intervalo de discretização adotado para chuva e para os hidrogramas foi de 30 minutos. Dados os hidrogramas unitários de cada um dos eventos, calculou-se a curva em S para cada um deles a partir da acumulação das

vazões unitárias. As curvas em S foram então posicionadas com base na origem e obteve-se a curva média. Posteriormente, esta última foi transformada no hidrograma unitário médio da bacia.

Cenários de modelagem da bacia

Na tabela 2 são relacionados os cenários e seus respectivos parâmetros utilizados para a modelagem da bacia. Foram simulados os 190 eventos selecionados para a análise. O CN da curva assintótica varia em função da precipitação efetiva e foi determinado para cada evento a partir do modelo analítico ajustado aos pares P:CN naturais (Equação 16).

Tabela 2 – Cenários de modelagem da bacia

Cenário	CN		I _a	HU
	Método	Símbolo		
1	SCS	CN _{SCS}	0,20.S	HU _{SCS}
2	Assintótico	CN _{ASSINT}	0,20.S	HU _{MÉDIO}

Para comparação dos resultados obtidos por cada cenário, calculou-se a diferença percentual dos parâmetros estimados em relação aos observados (Equação 17). Os parâmetros avaliados foram a precipitação efetiva (P_p), o tempo de pico (T_p), a vazão de pico (Q_p) e o tempo de base (T_b).

$$Diferença \% = \frac{(Observado - Estimado)}{Observado} \times 100\% \quad (17)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

CN médio da bacia conforme o método do SCS

A composição do uso e ocupação do solo da bacia e o CN associado à cada classe conforme a classificação proposta pelo SCS são indicados na tabela 3. O CN médio resultante é 65,24.

Tabela 3 – CN ponderado segundo as tabelas do SCS

Classe	% da Área de Drenagem	CN
Floresta Densa	17,4%	55
Reflorestamento	0,6%	55
Cerrado	19,4%	56
Área Urbana	2,9%	85
Agrícola/Pastagem	57,9%	69
Área Degradada	1,9%	86
Corpo d'água	0,1%	100
Solo Exposto	0,5%	86
CN médio		65,24

Aplicação do método de ajuste assintótico

A figura 2 mostra a curva de ajuste do CN em função da precipitação obtida pelo método de ajuste assintótico. A curva ajustada aos dados naturais é dada pela Equação 18 e a ajustada aos ordenados pela Equação 19.

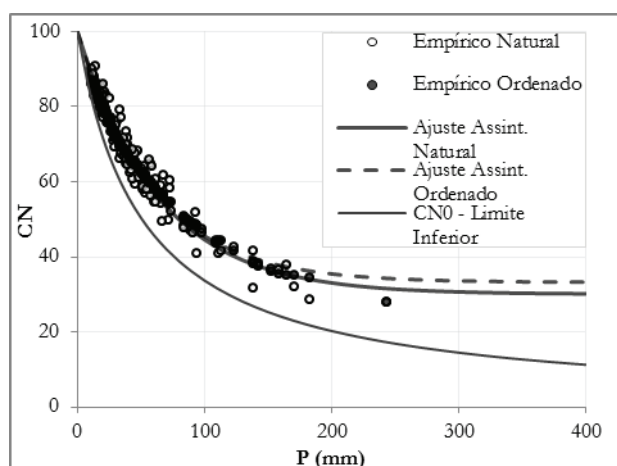


Figura 2 – Ajuste do modelo assintótico padrão aos dados da bacia

$$CN(P) = 30,0 + (100 - 30,0) \exp(-0,01569P) \\ \sum_{i=1}^n e_i^2 = 1359,0 \quad (18)$$

$$CN(P) = 33,2 + (100 - 33,2) \exp(-0,01687P) \\ \sum_{i=1}^n e_i^2 = 220,5,0 \quad (19)$$

Considerando o ajuste natural, o CN da bacia seria 30,0, valor este relativamente menor que aquele determinado pelas tabelas do SCS (65,24). Porém este valor é indicado para grandes eventos e nenhum dos eventos selecionados na série em estudo possuem valores suficientemente elevados. Logo, se o valor do CN de referência for aplicado a pequenos eventos, o escoamento superficial será subestimado. Por outro lado, se um valor superior ao de referência for adotado para grandes eventos, o escoamento superficial será superestimado. Esse é um indicativo da supertimação nos cálculos de escoamento superficial a partir de CNs obtidos pelas tabelas do SCS aplicados a eventos maiores, normalmente adotados nas condições de projeto.

Comparação entre a precipitação efetiva total observada e a obtida pelo método do SCS

A diferença percentual da precipitação efetiva modelada em relação à observada foi calculada para o método do SCS utilizando os CNs tabelados (CNSCS) e o modelo do ajuste assintótico (CNASSINT). A figura 3 mostra que os valores de P_e calculados pelo método do SCS são predominantemente superiores aos observados, principalmente para os eventos com maior P_e observada. Esta diferença é verificada pelo afastamento dos pontos plotados em relação à reta de 45°, que representa o ajuste perfeito. Os pontos com precipitação efetiva aproximadamente nula correspondem aos eventos de pequena magnitude, com precipitação inferior ou pouco superior às perdas iniciais. Especificamente nestes casos, a precipitação efetiva foi subestimada pelo método do SCS.

Em contrapartida, os valores obtidos a partir do CNASSINT estão mais próximos dos valores observados, como pode ser verificado na figura 4. A tabela 4 resume as diferenças observadas através de uma estatística descritiva. Estas estatísticas

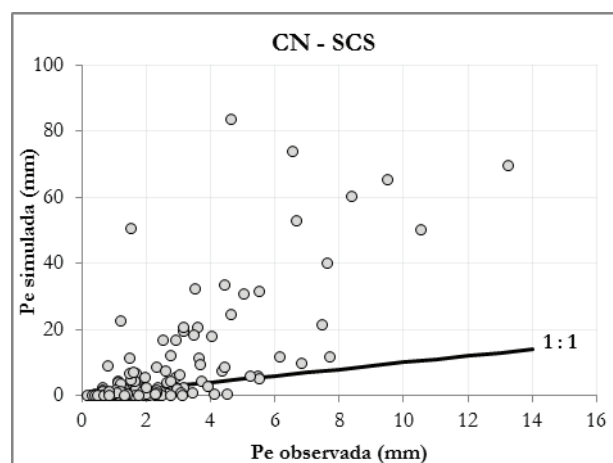


Figura 3 – Precipitação efetiva observada versus precipitação efetiva simulada pelo método do SCS

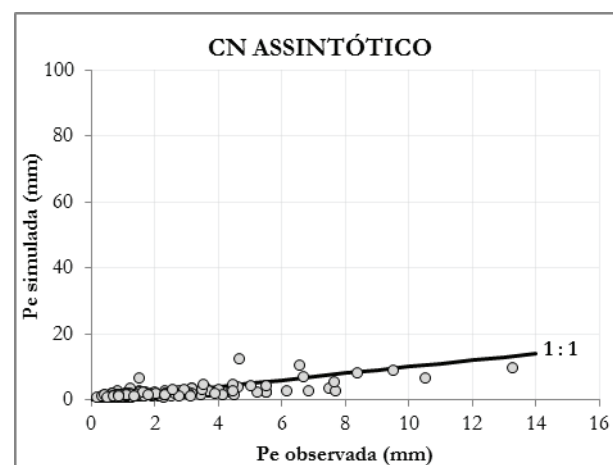


Figura 4 – Precipitação efetiva observada versus precipitação efetiva simulada pelo método do ajuste assintótico

Tabela 4 – Estatística descritiva da diferença percentual dos valores de precipitação efetiva calculados em relação aos observados

Precipitação Efetiva - Diferença %		
Estatística	CNASSINT	CNSCS
Mínimo	-68	-100
Média	24	76
Máximo	340	3262

destacam que os valores calculados com o CNSCS são em média 75% superiores aos observados, enquanto os calculados com o CNASSINT são em média 25%. Cabe também observar que a amplitude da variação é relativamente inferior em relação à verificada nos valores resultantes do CNSCS, como demonstrado pelos valores de máximo e mínimo e pela dispersão dos pontos em relação à reta de 45°.

Verificou-se também a relação entre a magnitude do evento de precipitação e as diferenças percentuais das precipita-

ções calculadas em relação às observadas. Na figura 5 constata-se que o método do SCS tende a superestimar a precipitação efetiva total para eventos maiores, o que é resultado do decaimento do CN com o aumento da precipitação. Já para eventos menores, a maior parte da precipitação é contabilizada nas perdas iniciais e, conseqüentemente, o escoamento superficial é subestimado.

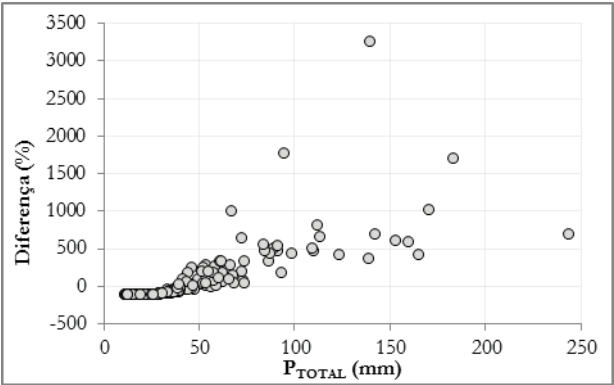


Figura 5 – Diferença percentual dos valores de precipitação efetiva obtidos pelos valores de CN tabelados em função da magnitude do evento

Uma análise similar aplicada aos resultados gerados a partir dos valores do CN do modelo de ajuste assintótico não permite concluir se o erro está relacionado à magnitude do evento (Figura 6). A variabilidade da precipitação efetiva obtida a partir da curva de ajuste assintótico pode estar associada à dispersão dos pontos em torno da curva, visto que o modelo do SCS é altamente sensível a variações do referido parâmetro. A comparação desta figura com a figura 5 também destaca a amplitude da variação do erro em relação aos valores obtidos com o CNSCS, como já foi indicado na tabela 5.

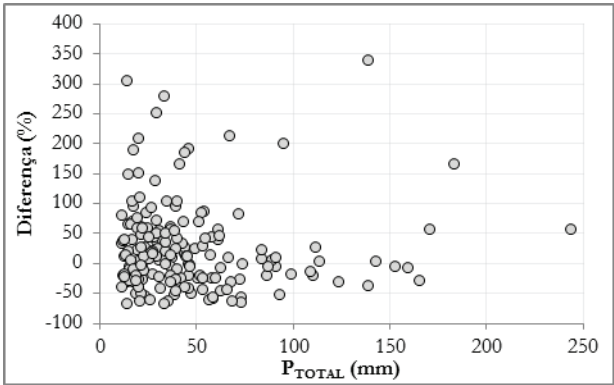


Figura 6 – Diferença percentual dos valores de precipitação efetiva obtidos pelos valores de CN do modelo em função da magnitude do evento

Comparação entre o hidrograma unitário sintético do NRCS e o hidrograma unitário derivado dos dados linigráficos

A figura 7 apresenta as vazões unitárias acumuladas para cada um dos eventos selecionados posicionados com base na origem. O hidrograma unitário médio da bacia resultante da curva das vazões unitárias médias acumuladas é exibido na figura 8.

O tempo de pico, a vazão de pico e o tempo de base foram calculados a partir do hidrograma unitário médio da bacia e conforme a metodologia do SCS (Tabela 5). Os valores da vazão de pico unitária e o tempo de pico da bacia do ribeirão Serra Azul obtidos pelo hidrograma unitário médio são consideravelmente superiores aos valores encontrados pelo método do SCS. Considerando que a relação entre o tempo de retardo e o tempo de concentração proposta pelo SCS (Equação 12) é válida, o tempo de pico obtido pelo $HU_{MÉDIO}$ é consistente com o estudo de Drumond (2004), que verificou por meio da técnica de traçadores que o tempo de concentração da mesma bacia tende, de forma assintótica, para um valor de aproximadamente

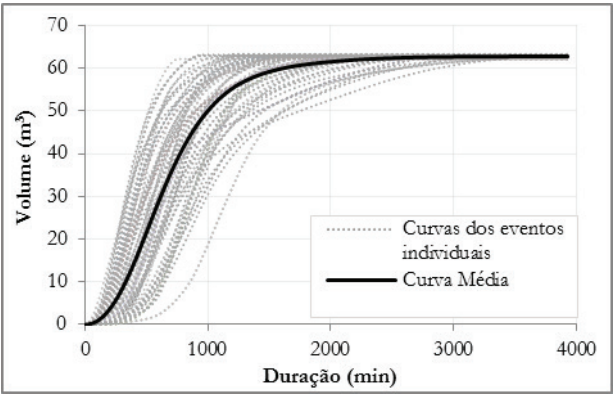


Figura 7 – Curva S média

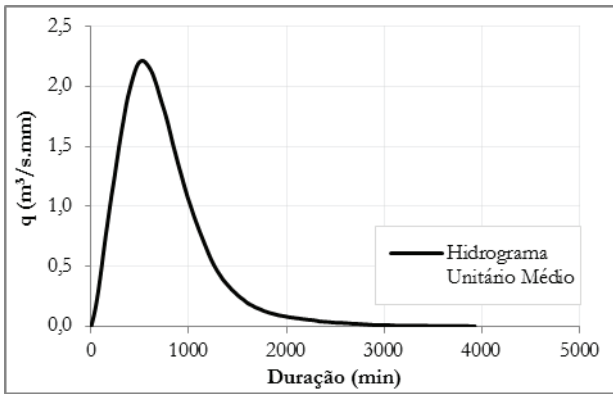


Figura 8 – Hidrograma unitário médio

Tabela 5 – Comparação entre as características do $HU_{MÉDIO}$ e HU_{SCS}

	$HU_{MÉDIO}$	HU_{SCS}
q_p (m³/s.mm)	2,19	7,10
T_p (h)	9,5	3,31
T_b (h)	2,80 T_p	2,67 T_p

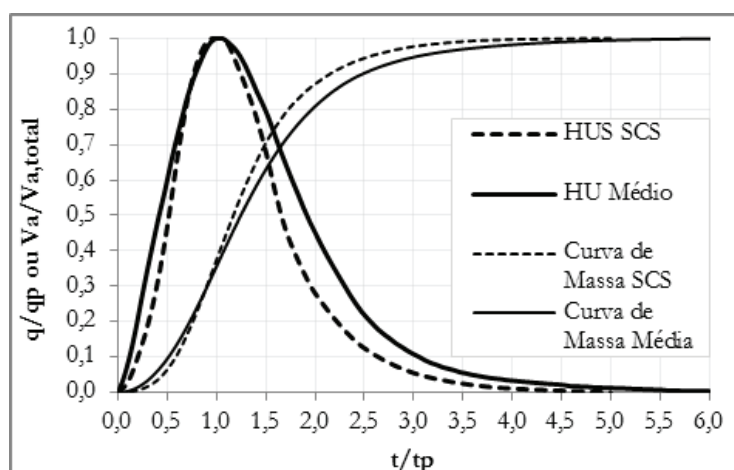


Figura 9 – Comparação entre o hidrograma unitário adimensional para a bacia em estudo e o hidrograma unitário sintético do SCS

Tabela 6 – Estatística descritiva da diferença percentual dos parâmetros calculados em relação aos observados

Cenário	T _p (%)		Q _p (%)		T _b (%)	
	1	2	1	2	1	2
Mínimo	-94	-33	-81	-59	-95	-54
Mediana	-16	0	-2,1	-0,1	-18	2,2
Média	20	23	158	4,6	-24	8,4
Máximo	1000	1500	1706	195	87	163

15,5 horas. Assim, a sobrestimação da vazão de pico unitária obtida pelo HU_{SCS} está associada principalmente à diferença entre os tempos de pico dos dois métodos.

Cabe ressaltar que, conforme pode ser visualizado na figura 7, há uma dispersão das curvas S em torno da média. Por consequência, o hidrograma unitário médio não é capaz de caracterizar bem a resposta da bacia a todos os eventos. Isso ocorre porque as condições ideais para a determinação do hidrograma unitário raramente ocorrem e a variabilidade espacial e temporal da chuva não é adequadamente representada através da chuva média calculada pelos polígonos de Thiessen. Uma outra limitação dessa metodologia é o posicionamento dos hidrogramas unitários com base na origem, que tende a reduzir o pico e as vazões de cheia (TUCCI, 2012).

O hidrograma unitário médio foi adimensionalizado para facilitar sua comparação com o hidrograma unitário sintético do SCS. Na figura 9 é apresentada a comparação entre o HU_{MÉDIO} obtido para a bacia em estudo e o HU_{SCS}.

O hidrograma unitário triangular equivalente ao derivado apresenta tempo de base igual a $2,80T_p$, em contraposição ao $2,67T_p$ proposto pelo SCS. A fórmula para cálculo da vazão de pico unitária ($m^3/s.mm$) correspondente a esse tempo de base seria, enquanto o HU_{SCS} propõe 0,208 como fator multiplicador da razão entre a área e o tempo de pico.

Como é possível observar pelos hidrogramas unitários adimensionais, não existe grande diferença entre o HU médio derivado para a bacia a partir de dados observados e o proposto pelo SCS. A diferença se deve principalmente à imprecisão na estimativa do tempo de concentração, sendo assim demonstrada a importância do cuidado na estimativa deste parâmetro.

Comparação entre os hidrogramas de cheia simulados e os observados

Para os 190 eventos simulados, foi calculada a diferença percentual dos parâmetros tempo de pico (T_p), vazão de pico (Q_p) e tempo de base (T_b) em relação aos dados observados. A tabela 6 apresenta um resumo dos erros percentuais obtidos e os gráficos (Figuras 10 a 15) a dispersão dos dados calculados em relação aos observados.

Como pode ser observado na tabela 6, a média dos erros relativos dos tempos de pico é semelhante para os cenários 1 e 2. Os maiores erros para ambos os casos em geral estão associados a eventos complexos e são, portanto, consequência da não linearidade do comportamento da bacia. Desconsiderando tais casos, os valores do SCS tendem a ser pouco menores que os obtidos pelo modelo, o que também pode ser observado através da análise visual dos hidrogramas simulados.

A média dos erros evidencia que o tempo de base é subestimado pelo método do SCS, enquanto o modelo calibrado aproxima melhor os valores observados. Porém, o erro máximo indica que o modelo calibrado tende a superestimar este parâmetro, o que é associado ao maior tempo de base do HU_{MÉDIO}.

O método do SCS tende a superestimar as vazões de pico, porém isso não ocorre para eventos de pequena magnitude, em que toda ou a maior parte da precipitação é computada como perda inicial. Observa-se também a grande variabilidade dos desvios relativos obtidos. Os desvios das vazões de pico podem ser atribuídos principalmente ao cálculo da precipitação efetiva, cujo volume é superestimado para maiores eventos, e à maior vazão de pico unitária decorrente do menor tempo de pico e de base do HU_{SCS}.

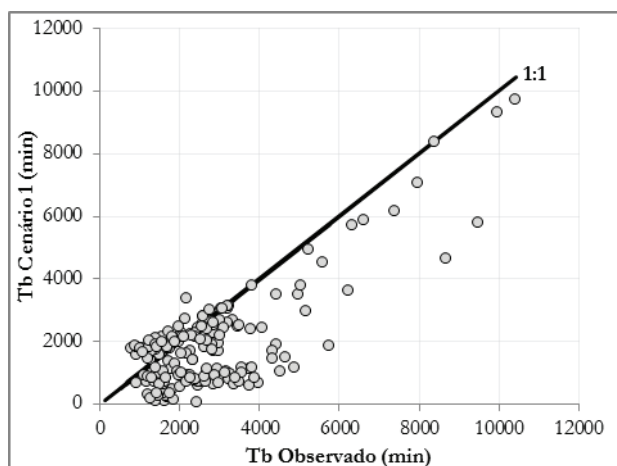


Figura 10 – Tempo de base do cenário 1 versus observado

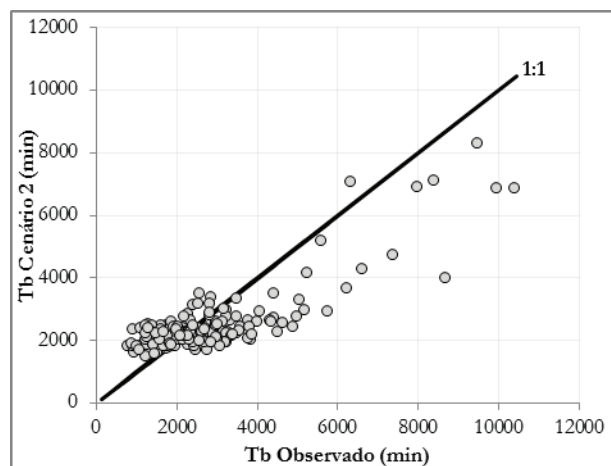


Figura 13 – Tempo de base do cenário 2 versus observado

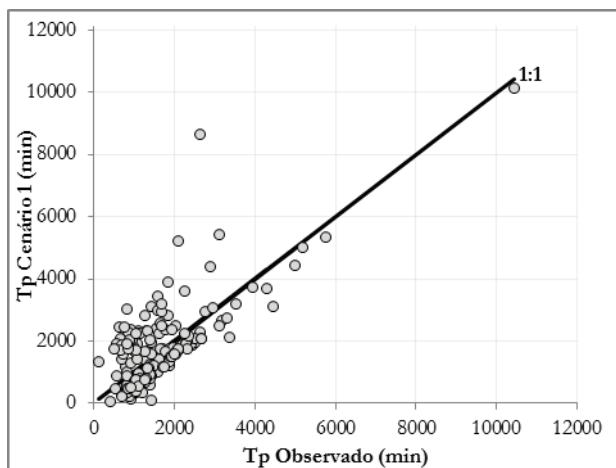


Figura 11 – Tempo de pico cenário 1 versus observado

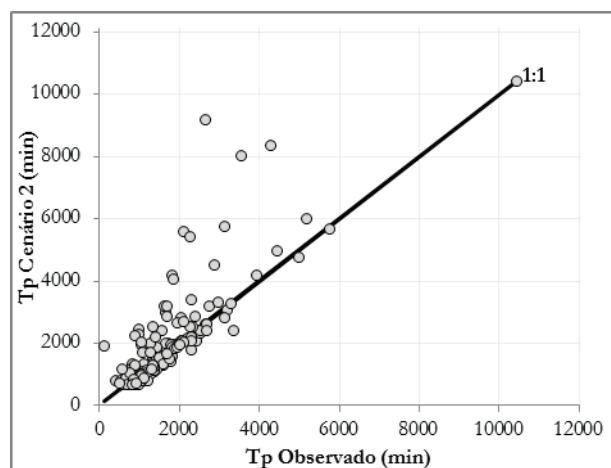


Figura 14 – Tempo de pico do cenário 2 versus observado

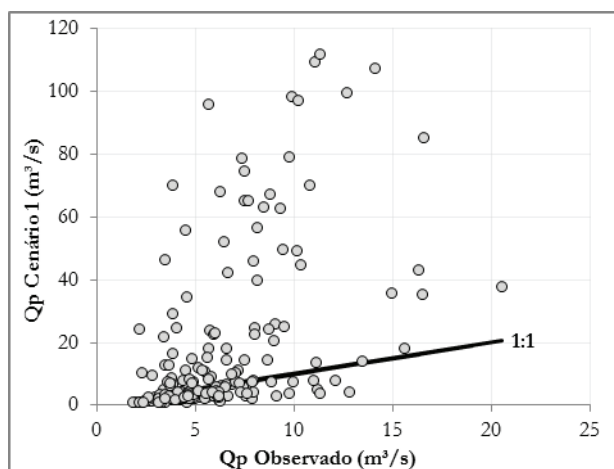


Figura 12 – Vazão de pico do cenário 1 versus observada

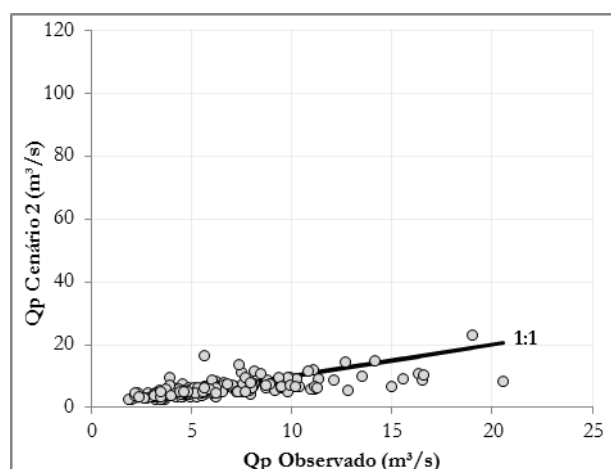


Figura 15 – Vazão de pico do cenário 2 versus observada

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O método do SCS vem sendo amplamente aplicado por sua versatilidade e tradição. Entretanto, as vantagens decorrentes de sua aplicação se contrapõem a erros que podem acarretar maiores custos às obras hidráulicas. O presente estudo, embasado por diversos outros autores, demonstra que o método não apresenta bom desempenho em locais distintos, o que está associado a sua formulação e parametrização.

Este artigo comparou os volumes de precipitação efetiva e os hidrogramas resultantes da aplicação da metodologia do SCS com eventos de chuva e vazão observados na bacia do ribeirão Serra Azul em Jardim (40511100). Além do método tradicional do SCS, foi proposta uma curva de ajuste assintótico para calibração do parâmetro CN em função da chuva. Deduziu-se também o hidrograma unitário a partir dos dados linigráficos e pluviográficos. Os 190 eventos selecionados para análise foram simulados segundo as duas metodologias mencionadas.

De acordo com o ajuste assintótico, o CN da bacia para eventos de grande magnitude seria aproximadamente 30, valor este consideravelmente inferior ao CN equivalente a 65,24 determinado pelas tabelas do SCS. Os resultados das simulações indicam que o método do SCS tende a superestimar o volume escoado, principalmente para eventos de maior magnitude. Em compensação, o modelo proposto para cálculo do CN em função da chuva forneceu resultados com menor erro percentual em relação aos eventos monitorados.

A combinação do modelo assintótico com o hidrograma unitário médio da bacia também gerou hidrogramas com menores vazões de pico em relação à aplicação do conjunto SCS-CN e hidrograma unitário sintético do SCS. Contudo, a sobrestimativa das vazões máximas não está necessariamente relacionada à forma do hidrograma unitário sintético do SCS. O hidrograma unitário adimensional derivado para a bacia demonstra que a sobrestimação das vazões de pico está associada principalmente à estimativa do tempo de concentração.

Os resultados gerados pela aplicação do modelo ajustado e do hidrograma unitário derivado para a bacia aproximam melhor os dados observados, mas ainda apresentam erros considerados significativos. A validação da metodologia descrita no presente artigo deve ser realizada em outras bacias hidrográficas monitoradas, se possível para eventos de maior magnitude. Faz-se necessária também a adoção de critérios com maior grau de padronização para seleção e separação dos eventos observados.

Os resultados deste estudo permitem concluir que método do SCS, desenvolvido há mais de cinco décadas, necessita de aprimoramento ou substituição por outras metodologias desenvolvidas mais recentemente para que as necessidades atuais sejam atendidas. Os custos de uma aplicação mais criteriosa do método ou de outros de melhor desempenho são possivelmente compensados com a redução dos custos decorrentes do superdimensionamento em projetos de engenharia de recursos hídricos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CPRM e ao Eng. Éber Pinto

pelo fornecimento dos dados linigráficos e pluviográficos. Agradecimentos também ao professor Mauro Naghettini pela revisão e à equipe da Potamos Engenharia e Hidrologia pela colaboração no desenvolvimento do trabalho.

REFERÊNCIAS

- BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica. Divisão de Controle de Recursos Hídricos. 5º Distrito (Brasília, DF). *Bacia representativa de Juatuba: dados do período 1976-1980*. Brasília: DNAEE, 1986. (Série E-03).
- CHOW, V. T. C.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. *Applied hydrology*. 2. ed. New York: McGraw-Hill Higher Education, 1988.
- D'ASARO, F.; GRILLONE, G.; BAIAMONTE, G. Comparison between curve number empirical values and curve number obtained by handbook tables at basin scale in Sicily, Italy. In: International Conference of Agricultural Engineering, Valencia, 2012. *Proceedings...* Valencia: CIGR-AgEng, 2012.
- DRUMOND, M. M. A técnica de traçadores e o seu potencial para ampliar o conhecimento hidrológico sobre as bacias brasileiras: um estudo aplicado à Bacia Representativa de Juatuba - MG. 2010. 301 f. Tese (Doutorado em Engenharia Sanitária e Recursos Hídricos) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2004.
- ELHAKEEN, M.; PAPANICOLAOU, A. N. Estimation of the Runoff Curve Number via Direct Rainfall Simulator Measurements in the State of Iowa, USA. *Water Resour. Manag.*, v. 23, n. 12, p. 2455-2473, Jan. 2009. Disponível em: <<http://link.springer.com/article/10.1007/s11269-008-9390-1>>. Acesso em: 1 fev. 2014.
- GAREN, D. C.; MOORE, D. S. Curve Number hydrology in water quality modeling: uses, abuses, and future directions. *J. Am. Water Resour. Assoc.*, v. 41 n. 2, p. 377-388, Apr. 2005. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1752-1688.2005.tb03742.x/abstract>>. Acesso em: 15 fev. 2014.
- HAWKINS, R. H. Asymptotic Determination of Runoff Curve Numbers from Data. *J. Irrig. Drainage Eng.*, v. 119, n. 2, p. 334-345, Mar. 1993.
- HAWKINS, R. H.; WARD, T. J.; WOODWARD, D. E.; MULLEM, J. A. V. *Curve number hydrology: state of the practice*. Reston: ASCE/EWRI Curve Number Hydrology Task Committee, 2009.
- HJELMFELT, A. T. Investigation of Curve Number Procedure. *J. Hydraulic Eng.*, v. 117, n. 6, p. 725-737, June 1991.
- JAIN, M. K.; MISHRA S. K.; BABU P. S.; VENUGOPAL, K.; SINGH, V. P. Enhanced runoff curve number model incorporating storm duration and a nonlinear Ia-S relation. *J.*

Hydrol. Eng., v. 11 n. 6, p. 631-635, Nov. 2006.

LIM, K. J.; ENGEL, B. A.; TANG, Z.; CHOI, J.; KIM, K.; MUTHUKRISHNAN, S.; TRIPATHY, D. Automated Web GIS Based Hydrograph Analysis Tool, WHAT. *J. Am. Water Resour. Assoc.*, v. 41, n. 6, 1407-1416, Dec. 2005. Disponível em: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1752-1688.2005.tb03808.x/abstract>>. Acesso em: 15 jan. 2014.

MISHRA, S.; PANDEY, A.; SINGH, V. (Ed.). Special Issue on Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) Methodology. *J. Hydrol. Eng.*, v. 17, n. 11, p. 1157, Oct. 2012.

MISHRA, S. K.; SURESH BABU, P.; SINGH, V. P. SCS-CN method revisited. In: SINGH, V. P. (Ed.). *Advances in hydraulics and hydrology*. Littleton (CO): Water Resources Publication (WRP), 2007.

MOCKUS, V. *Use of storm and watershed characteristics in synthetic hydrograph analysis and application*. California: American Geophysical Union, Pacific Southwest Region, Sacramento, 1957. apud Natural Resources Conservation Service. *National Engineering Handbook*. Part 630: Hydrology. Washington DC: USDA, 2004.

MULLEM, V. A. J.; WOODWARD, D. E.; HAWKINS, R. H.; HJELMFELT Jr A. T. Runoff Curve Number Method: Beyond the Handbook. In: Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference, 2., 2002. Las Vegas. *Proceedings...* Las Vegas: NOAA, 2002.

NRCS - NATURAL RESOURCES CONSERVATION SERVICE. *National engineering handbook*. Part 630: Hydrology. Washington DC: USDA, 2004.

PINHEIRO, M. C. *Diretrizes para elaboração de estudos hidrológicos e dimensionamentos hidráulicos em obras de mineração*. Porto Alegre: ABRH, 2011.

PONCE, V. M.; HAWKINS, R. H. Runoff Curve Number: Has It Reached Maturity? *J. Hydrol. Eng.*, v. 1, n. 1, p. 11-19, Jan. 1996.

SARTORI, A. Desenvolvimento de critérios para classificação hidrológica de solos e determinação de valores de referência para o parâmetro CN. 2010. 237 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

SILVEIRA, A. L. L. Desempenho de Fórmulas de Tempo de Concentração em Bacias Urbanas e Rurais. *RBRH: revista brasileira de recursos hídricos*, v. 10, n. 1, p. 5-23, jan./mar. 2005. Disponível em: <https://www.abrh.org.br/sgcv3/UserFiles/Sumarios/9069c5e8a3333d5348b9babd06aaa510_7aad3403a5602667b67dfbb7c3cbd16a.pdf>. Acesso em: 28 fev. 2014.

STEWART, D.; CANFIELD, E.; HAWKINS, R. Curve Number Determination Methods and Uncertainty in Hydrologic Soil Groups from Semiarid Watershed Data. *J. Hydraulic Eng.*, v. 17, n. 11, p. 1180-1187, Nov. 2012.

TEDELA, N. H. Runoff Curve Numbers for 10 Small Forested Watersheds in the Mountains of the Eastern United States. *J. Hydraulic Eng.*, v. 17, n. 11, p. 1188-1198, Nov. 2012.

TUCCI, C. E. M. (Org). *Hidrologia: ciência e aplicação*. 4. ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2012

Contribuição dos autores:

Stéphanie Fernandes Cunha: Pesquisa bibliográfica, processamento dos dados hidrológicos e análise dos resultados.

Francisco Eustáquio Oliveira e Silva: Coordenação do projeto e consistência dos dados hidrológicos.

Tainá Ulhoa Mota: Seleção de eventos e desenvolvimento das simulações.

Mário Cicareli Pinheiro: Professor Orientador