



GEOVANE JUNQUEIRA ALVES

**APLICABILIDADE DO MÉTODO CN-SCS A
UMA BACIA HIDROGRÁFICA
REPRESENTATIVA DOS LATOSSOLOS NO
SUL DE MG**

LAVRAS – MG

2016

GEOVANE JUNQUEIRA ALVES

**APLICABILIDADE DO MÉTODO CN-SCS A UMA BACIA
HIDROGRÁFICA REPRESENTATIVA DOS LATOSSOLOS NO SUL DE
MG**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas, para a obtenção do título de Mestre.

Orientador

Dr. Carlos Rogério de Mello

Coorientador

Dr. Samuel Beskow

LAVRAS – MG

2016

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

Alves, Geovane Junqueira.

Aplicabilidade do método CN-SCS a uma bacia hidrográfica
representativa dos Latossolos no Sul de MG / Geovane Junqueira
Alves. – Lavras : UFLA, 2016.

156 p. : il.

Dissertação (mestrado acadêmico)—Universidade Federal de
Lavras, 2016.

Orientador(a): Carlos Rogério de Mello.

Bibliografia.

1. Escoamento Superficial Direto. 2. Método CN-SCS. 3.
Hidrologia de Superfície. 4. Abstração Inicial. 5.
Geoprocessamento. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

GEOVANE JUNQUEIRA ALVES

**APLICABILIDADE DO MÉTODO CN-SCS A UMA BACIA
HIDROGRÁFICA REPRESENTATIVA DOS LATOSSOLOS NO SUL DE
MG**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas, para a obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 9 de setembro de 2016.

Dr. Adriano Valentim Diotto

UFLA

Dr. Samuel Beskow

UFPEl

Dr. Carlos Rogério de Mello
Orientador

LAVRAS – MG

2016

A José Carlito Alves, meu pai (in memoriam), que durante sua vida, e mesmo após seu falecimento, me proporcionou tudo que estava ao seu alcance e um pouco mais, ensinando-me os verdadeiros valores humanos e cristãos.

À minha mãe, Elizete, por me mostrar o sentido da humildade, da fé, da esperança, do trabalho, e da união familiar, que sem dúvida são as coisas mais importantes da vida.

Vocês foram e são para mim, o maior exemplo de vida, matrimônio, e de amor que alguém poderia ter.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pela vida, e por sempre me guiar por seus caminhos, dando-me coragem para enfrentar todos os obstáculos que neles se encontram.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas, pela formação profissional e estrutura física oferecida.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), e à CEMIG, pelo suporte financeiro, a bolsa de estudos.

Ao meu orientador, Dr. Carlos Rogério de Mello, pelo exemplo de profissionalismo, orientação, amizade, e pela compreensão e total apoio durante o período difícil que passei.

A todos os professores do Núcleo de Estudos de Engenharia de Água e Solo da UFLA, em especial ao Dr. Antônio Marciano da Silva, ao Dr. Gilberto Coelho e ao Dr. Marcelo Ribeiro Viola, pelo convívio, amizade e orientação ao longo de minha formação profissional.

À minha namorada, Mariana, pelo seu total apoio e por mostrar ser uma pessoa companheira nestes 3 anos de namoro; aos meus pais, José Carlito (*in memoriam*) e Elizete; à minha irmã Marília, que sempre me apoiou em minhas decisões; e a todos os meus amigos e familiares, que me acompanharam ao longo desta etapa. Meus sinceros agradecimentos aos meus tios Juninho e Eduardo, aos meus amigos do peito Éder e Guilherme (João Branco), e àqueles que acompanharam de perto minha vida acadêmica, Alisson, Rosângela, Lívia Alvarenga, José Neto, Matheus Durães, Vinícius Oliveira, Léo Ávila.

E por fim, a todos aqueles que de alguma maneira colaboraram para a conclusão deste trabalho.

MUITO OBRIGADO!

RESUMO

O Método CN-SCS (Curve Number – Soil Conservation Service) é um modelo chuva-deflúvio que consiste da aproximação empírica entre um dado evento de chuva e as condições de superfície da bacia hidrográfica, utilizado para estimativa do escoamento superficial direto (Q), a partir de dados de precipitação (P), usos e classes do solo da bacia. Durante seu desenvolvimento, foi definida uma relação entre o parâmetro abstração inicial da chuva (Ia) e o armazenamento potencial de água do solo (S) igual a 0,2. Esta relação vem sendo estudada por vários autores, sendo que muitos deles têm encontrado valores inferiores a este, sendo esta uma das principais fontes de erro vinculadas ao método. Outro parâmetro de suma importância para a quantificação de Q é o valor de CN propriamente dito, o qual é difícil de ser estabelecido com exatidão, uma vez que depende da combinação existente entre a classe de solo, a cobertura vegetal e a umidade antecedente do solo, além das características da chuva. O objetivo deste trabalho foi avaliar os valores de Q estimados para a bacia hidrográfica do ribeirão Jaguara (BHRJ) inserida na região do Alto Rio Grande, na qual existe monitoramento hidro-climático desde 2006, através da aplicação do método CN-SCS em que os valores de CN foram determinados com base em 29 métodos. Os primeiros basearam-se na combinação feita entre os mapas de uso e de classes de solo, gerando-se um mapa de CN na condição de umidade II (CN_{II}) para a BHRJ. Através da média ponderada de cada valor de CN com sua respectiva área, e considerando as 3 condições de umidade antecedentes existentes, foram obtidos 3 valores de CN médio, sendo um para cada condição de umidade. De outra forma, com os dados de Q observados, e isolando-se algebricamente o valor de S na equação, calculou-se um valor de CN para cada evento. Metodologia similar foi aplicada para os eventos chuva-deflúvio ordenados de forma decrescente e independente, que após alguns ajustes, com base no método nos quadrados mínimos, determinou-se um valor de CN assintótico para a bacia, que, posteriormente, resultou em uma equação de CN em função da precipitação. Outras metodologias aplicadas na determinação do CN também se baseiam em eventos chuva-deflúvio ordenados, porém, esta consideração é feita para identificar a distribuição espacial dos valores de CN, levando em consideração as características geomorfológicas da bacia. Em um primeiro instante, apenas dois valores de CN foram considerados, depois, foram ajustados números de valores de CN igual àquele obtido através da combinação feita entre os mapas de uso e classes de solo. Para todos os métodos, 3 valores de λ (Ia/S) foram considerados: 0,2, 0,05, 0,02, tanto para o cálculo de S, quanto para a estimativa de Q, permitindo assim, inferir sobre seu comportamento. Finalmente, através da aplicação de três estatísticas de precisão, foi avaliado qual o melhor método de determinação do CN, assim como o valor de λ que

mais aproxima a estimativa de Q aos valores observados, sendo estes últimos, obtidos através dos 166 eventos chuva-deflúvio observados. Foi observado que alguns métodos foram eficazes na estimativa de Q , principalmente aqueles que se basearam nos eventos chuva-deflúvio. A determinação do CN baseado apenas nos mapas de uso e classe de solo, não apresentou bons resultados na estimativa de Q , mesmo considerando as 3 condições de umidade antecedente. As melhores estimativas resultaram dos métodos baseados nos valores de $\lambda = 0,02$ e $\lambda = 0,05$.

Palavras-chave: Escoamento superficial direto. Método CN-SCS. Hidrologia de superfície. Abstração inicial. Geoprocessamento.

ABSTRACT

The CN-SCS (Curve Number - Soil Conservation Service) method is a rainfall-runoff model that considers an empirical approximation between a given rainfall event and the surface conditions of a hydrologic unit. It has been used to estimate the direct surface runoff (Q) from total rainfall (P), taking into account soil classes and their uses. It was developed considering a relationship between the initial rainfall abstraction (Ia) and the maximum soil-water storage potential (S) that was defined equal to 0.2. Ia parameter has been largely studied by many authors, and most of them have found values lower than 0.2, being this one of the main sources of error associated with the method. Another parameter of paramount importance for the Q estimation is the current value of CN, which is difficult to establish with precision, since it depends on the combination between soil class, vegetation cover and antecedent soil moisture, besides the physical characteristics of the rain. The objective of this study was to evaluate the estimated Q values for Jaguara Creek Watershed (JCW), using the CN-SCS method, in which CN values were determined based on 29 methods. JCW is located in the Upper Grande River region, southern Minas Gerais, whose weather and streamflow datasets have been monitored since 2006. The first procedure for CN was based on the combination between the use and soil classes maps, generating a CN map in the moisture condition II (CN_{II}) for JCW. Based on the weighted average of each value of CN and its respective area, and considering the 3 existing soil moisture antecedent conditions (defined by the antecedent amount of rainfall), 3 values of average CN were obtained. Otherwise, with the observed Q data the respective S value was calculated, and then, the estimated CN for each event. Similar methodology was applied for the rainfall-runoff events which were ordered in a decreasing and independent way. Based on the minimum square method, an asymptotic CN value was determined, which, in turn, resulted in an equation in function of rainfall. Other methodologies applied in the CN determination are also based on ordered rainfall-runoff events, however, this procedure was carried out to identify the spatial distribution of CN, taking into account the geomorphological characteristics of the watershed. At first, only two CN values were considered, then CN numbers were set equal to those obtained through the combination between soil classes and soil use maps. For all the methods, 3 values of λ (Ia/S relationship) were considered: 0.2, 0.05, 0.02, all of them used for S calculation, and further Q estimation, thus allowing to infer about their behavior. Finally, by means the application of three precision statistics, it was evaluated the best method for CN determination, as well as the λ values more closely approximates the Q estimated to the observed one. For that, 166 rainfall-runoff events were taken into consideration. It was also observed that some methods were effective

in the Q estimation, especially those based on rainfall-runoff events. CN determination based only on the land use and soil classes maps did not show good results, even considering the 3 soil moisture antecedent conditions. Finally, the best estimates resulted from the methods based on the λ values of 0.02 and 0.05.

Keywords: Direct surface runoff. CN-SCS Method. Surface hydrology. Initial abstraction. Geoprocessing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Principais componentes do ciclo hidrológico.....	27
Figura 2	Localização da BHRJ inserida no contexto da bacia hidrográfica do Rio Grande e do Estado de Minas Gerais.....	47
Figura 3	Modelo Digital de Elevação da BHRJ	48
Figura 4	Distribuição dos valores de declividade na BHRJ	49
Figura 5	Distribuição das classes de solo na BHRJ	50
Figura 6	Distribuição das classes de uso do solo na BRHJ	52
Figura 7	Estação meteorológica compacta localizada na BHRJ	53
Figura 8	Seção controle do ribeirão Jaguara, juntamente com a estrutura de abrigo e instalação do linígrafo	54
Figura 9	Representação da determinação assintótica do parâmetro CN apresentada por Hawkins (1993) através de dois comportamentos distintos: <i>Complacent behaviour</i> e <i>standard behaviour</i>	69
Figura 10	Representação do ajuste do método <i>two CN system approach</i> com o método de determinação assintótica do parâmetro CN apresentado por Hawkins (1993) para dois comportamentos distintos: <i>Complacent behaviour</i> e <i>standard behaviour</i>	74
Figura 11	Variabilidade espacial do parâmetro CN para a BHRJ baseado na tabela do NEH-4 (SCS 1956, 1964, 1971, 1985, 1993, 2004), adaptados de Huffman et al. (2011), e Mello e Silva (2013).....	96
Figura 12	Mapa de CN gerado pelo ajuste do modelo heterogêneo para $\lambda = 0,2$ - M27	124

Figura 13	Mapa de CN gerado pelo ajuste do modelo heterogêneo para $\lambda = 0,05$ - M28.....	124
Figura 14	Mapa de CN gerado pelo ajuste do modelo heterogêneo para $\lambda = 0,02$ - M29.....	125

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	Hidrograma referente ao ano hidrológico 2011/2012 na BHRJ	34
Gráfico 2	Volume de escoamento superficial direto (Q) estimado em função de P e de CN para $\lambda = 0,2$ e CNII.....	41
Gráfico 3	Curva chave ajustada para a seção controle da BHRJ.....	55
Gráfico 4	Representação do hietograma e hidrógrafa utilizada para a separação do escoamento superficial direto do escoamento base para um evento isolado.....	56
Gráfico 5	Representação da obtenção da abstração inicial e do armazenamento potencial de água no solo	57
Gráfico 6	Variação dos valores de CN calculados para cada evento na BHRJ	88
Gráfico 7	Variação dos valores de Ia separados para cada evento na BHRJ..	90
Gráfico 8	Variação dos valores de S para cada evento na BHRJ	91
Gráfico 9	Ajuste do modelo simplificado chuva-deflúvio	93
Gráfico 10	Ajuste do modelo simplificado chuva-deflúvio para cada AMC ...	94
Gráfico 11	Ajuste dos dados de Q estimado comparativamente com os dados observados para o modelo simplificado chuva-deflúvio	95
Gráfico 12	Valores de Q estimados pelo método M1 comparados aos observados na BHRJ	98
Gráfico 13	Valores de Q estimados pelo método M2 comparados aos observados na BHRJ	99
Gráfico 14	Valores de Q estimados pelo método M3 comparados aos observados na BHRJ	101
Gráfico 15	Valores de Q estimados pelo método M4 comparados aos observados na BHRJ	102

Gráfico 16	Valores de Q estimados pelo método M5 comparados aos observados na BHRJ	102
Gráfico 17	Valores de Q estimados pelo método M6 comparados aos observados na BHRJ	104
Gráfico 18	Valores de Q estimados pelo método M7 comparados aos observados na BHRJ	104
Gráfico 19	Valores de Q estimados pelo método M8 comparados aos observados na BHRJ	105
Gráfico 20	Valores de Q estimados pelo método M9 comparados aos observados na BHRJ	106
Gráfico 21	Valores de Q estimados pelo método M10 comparados aos observados na BHRJ	107
Gráfico 22	Valores de Q estimados pelo método M11 comparados aos observados na BHRJ	107
Gráfico 23	Valores de Q estimados pelo método M12 comparados aos observados na BHRJ	109
Gráfico 24	Valores de Q estimados pelo método M13 comparados aos observados na BHRJ	109
Gráfico 25	Valores de Q estimados pelo método M14 comparados aos observados na BHRJ	110
Gráfico 26	Determinação assintótica do CN para BHRJ para diferentes valores de λ	111
Gráfico 27	Variabilidade dos valores de CN calculados para diferentes valores de λ na BHRJ.....	113
Gráfico 28	Valores de Q estimados pelo método M15 comparados aos observados na BHRJ	114
Gráfico 29	Valores de Q estimados pelo método M16 comparados aos observados na BHRJ	115

Gráfico 30	Valores de Q estimados pelo método M17 comparados aos observados na BHRJ	115
Gráfico 31	Valores de Q estimados pelo método M18 comparados aos observados na BHRJ	117
Gráfico 32	Valores de Q estimados pelo método M19 comparados aos observados na BHRJ	117
Gráfico 33	Valores de Q estimados pelo método M20 comparados aos observados na BHRJ	118
Gráfico 34	Valores de Q estimados pelo método M21 comparados aos observados na BHRJ	119
Gráfico 35	Valores de Q estimados pelo método M22 comparados aos observados na BHRJ	120
Gráfico 36	Valores de Q estimados pelo método M23 comparados aos observados na BHRJ	120
Gráfico 37	Valores de Q estimados pelo método M24 comparados aos observados na BHRJ	121
Gráfico 38	Valores de Q estimados pelo método M25 comparados aos observados na BHRJ	122
Gráfico 39	Valores de Q estimados pelo método M26 comparados aos observados na BHRJ	122
Gráfico 40	Valores de Q estimados pelo método M27 comparados aos observados na BHRJ	126
Gráfico 41	Valores de Q estimados pelo método M28 comparados aos observados na BHRJ	126
Gráfico 42	Valores de Q estimados pelo método M29 comparados aos observados na BHRJ	127
Gráfico 43	Modelo heterogêneo de determinação do CN aplicado à BHRJ para 3 valores de λ	137

Gráfico 44	Varição dos valores de CN obtidos pelos métodos M3, M4, M5, M9, M10 e M11 para $\lambda = 0,02$	139
Gráfico 45	Varição dos valores de CN obtidos pelos métodos M2, M12, M13 e M14 para $\lambda = 0,05$	139
Gráfico 46	Varição dos valores de CN obtidos pelos métodos M1, M6, M7 e M8 para $\lambda = 0,2$	140

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Precipitação ocorrida nos últimos 5 dias para a estimativa das condições de umidade antecedente.....	42
Tabela 2	Infiltrabilidade básica do solo (IB) para identificação do grupo hidrológico	44
Tabela 3	Valores de CN a serem atribuídos para $\lambda = 0,2$ e AMC II	45
Tabela 4	Resumo dos 29 métodos e sequência de aplicação das equações para determinação dos valores de CN para a BHRJ.....	59
Tabela 5	Dados observados de 2006 a 2016 para a BHRJ (continua...)	82
Tabela 6	Valores de CN e respectivas áreas de ocorrência na BHRJ	97
Tabela 7	Valores de CN calculados pelos métodos M3, M4 e M5 e suas respectivas estatísticas de precisão para a estimativa de Q	100
Tabela 8	Valores de CN calculados com base nos métodos M6, M7 e M8 e suas respectivas estatísticas de precisão para a estimativa de Q ..	103
Tabela 9	Valores de CN calculados pelo M9, M10 e M11 e suas respectivas estatísticas de precisão para a estimativa de Q.....	106
Tabela 10	Valores de CN calculados pelo M9, M10 e M11 e suas respectivas estatísticas de precisão para a estimativa de Q.....	108
Tabela 11	Parâmetros de ajuste para a determinação assintótica do CN para a BHRJ	112
Tabela 12	Estatísticas de precisão para estimativa de Q calculados por M15, M16 e M17	114
Tabela 13	Parâmetros de ajuste para a determinação assintótica do CN para a BHRJ e os valores das estatísticas de precisão para a estimativa de Q calculados por M18, M19 e M20	116

Tabela 14	Parâmetros de ajuste para a determinação do CN através do modelo Two-CN system approach para a BHRJ e os valores das estatísticas de precisão para a estimativa de Q obtidos por M21, M22 e M23	119
Tabela 15	Valores das estatísticas de precisão para a estimativa de Q obtidos por M24, M25 e M26	121
Tabela 16	Parâmetros de ajuste para a determinação do CN para a BHRJ através dos métodos M27, M28 e M29 de acordo com o ‘Modelo Heterogêneo’	123
Tabela 17	Estatísticas de precisão para a estimativa de Q calculados por M27, M28 e M29	125
Tabela 18	Valores de CN calculados e suas respectivas estatísticas de precisão para a estimativa de Q – M1 a M14	129
Tabela 19	Valores de CN calculados e suas respectivas estatísticas de precisão para a estimativa de Q – M15 a M20	130
Tabela 20	Valores de CN calculados e suas respectivas estatísticas de precisão para a estimativa de Q – M21 a M29	130

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

CN	Curve Number
Ia	Abstração inicial (mm)
S	Armazenamento potencial de água no solo (mm)
λ	Coefficiente de abstração inicial
Q	Escoamento superficial direto ou deflúvio (mm)
P	Precipitação total do evento (mm)
AMC	Condição de umidade antecedente
V	Vazão (m^3s^{-1})
H	Lâmina registrada pelo linígrafo (cm)
Q_t	Vazão de escoamento base no tempo t (L^3T^{-1})
Q_{t_0}	Vazão de escoamento base no tempo t_0 (L^3T^{-1})
α	Coefficiente de recessão
t_0	Dia Juliano
A_i	Área de cada valor de CN a ser atribuído
A_T	Área total da bacia (km^2)
$S_{0,05}$	Armazenamento potencial de água no solo para $\lambda = 0,05$ (mm)
$CN_{0,05}$	Curve Number para $\lambda = 0,05$
CN_∞	Curve Number para precipitação tendendo ao infinito
μ_1 e μ_2	Coefficientes de ajuste para determinação assintótica de CN
RMSE	Raiz do quadrado médio do erro
C_{NS}	Coefficiente de Nash-Sutcliffe
Pbias	Coefficiente de Pbias
n	Número de eventos utilizados
Q_{obs}	Escoamento superficial direto observado

Q_e	Escoamento superficial direto estimado
P_5	Precipitação total ocorrida nos 5 dias antecedentes ao evento considerado
M	Métodos de determinação do CN
SCS	Serviço de Conservação do Solo
NRCS	Serviço de Conservação dos Recursos Naturais
BHRJ	Bacia Hidrográfica do Ribeirão Jaguara
IB	Infiltrabilidade Básica
GD1	Unidade de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos do Alto Rio Grande

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	22
2	REFERENCIAL TEÓRICO	25
2.1	Importância e distribuição da água	25
2.2	O ciclo hidrológico	26
2.3	Modelagem chuva-escoamento superficial direto (ou chuva-deflúvio)	29
2.4	O escoamento superficial e seus componentes	31
2.4.1	Generalidades	31
2.4.2	Separação dos escoamentos numa hidrógrafa	35
2.5	Método CN-SCS	36
2.5.1	Descrição do método	36
2.5.2	O armazenamento potencial de água no solo (S)	40
2.5.3	Condições de umidade antecedente	41
2.5.4	Classificação hidrológica dos solos	43
2.5.5	Determinação dos valores de CN	44
3	MATERIAL E MÉTODOS	47
3.1	Caracterização da bacia hidrográfica do ribeirão Jaguará (BHRJ)	47
3.2	Monitoramento hidrológico e meteorológico	52
3.3	Determinação do hidrograma de escoamento superficial	55
3.4	Análise da abstração inicial	57
3.5	Determinação do parâmetro CN (<i>Curve Number</i>) para a BHRJ	58
3.5.1	Mapeamento dos valores de CN derivados da tabela NEH-4	60
3.5.2	Determinação média do CN através de dados observados (λ , Q e P_5)	63
3.5.3	Determinação de CN considerando $\lambda = 0,2$, Q e P_5	65

3.5.4	Determinação de CN considerando $\lambda = 0,02$, Q e P_5	66
3.5.5	Determinação de CN considerando $\lambda = 0,05$, Q e P_5	68
3.5.6	Determinação dos valores de CN pelo método <i>Asymptotic Determination of runoff Curve Numbers</i> (HAWKINS, 1993).....	68
3.5.7	Determinação do CN através da aproximação com um sistema de dois valores de CN <i>The Two-CN system approach</i> (SOULIS; VALIANTZAS, 2012)	72
3.6	Estatísticas de precisão	79
3.6.1	Raiz do quadrado médio do erro (RMSE)	79
3.6.2	Coefficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (C_{NS})	79
3.6.3	Coefficiente P_{bias}	80
4	RESULTADOS	82
4.1	Apresentação dos dados observados aplicados a este estudo	82
4.2	Relação chuva-deflúvio na BHRJ	92
4.3	Métodos de determinação do parâmetro CN	95
4.3.1	Parâmetro CN obtido espacialmente com base na tabela do NEH-4 –Métodos M1 e M2	96
4.3.2	Parâmetro CN obtido através de eventos chuva-deflúvio não ordenados – Métodos M3 a M14	100
4.3.3	Parâmetro CN obtido através da metodologia baseada em eventos chuva-deflúvio ordenados – M15 a M29	110
5	DISCUSSÃO	128
6	CONCLUSÕES	143
	REFERÊNCIAS	144

1 INTRODUÇÃO

O escoamento superficial direto é uma das fases terrestre do ciclo hidrológico, e sua estimativa é um dos mais importantes problemas enfrentados pela hidrologia aplicada. Sendo assim, simples métodos para a predição do escoamento superficial direto em bacias hidrográficas, através do uso de variáveis conhecidas, tais como precipitação, uso e classe de solo, são extremamente importantes no que se diz respeito à elaboração de projetos hidráulicos para contenção e controle de cheias, assim como no cálculo do balanço hídrico.

Dentre os vários métodos existentes para a estimativa do escoamento superficial direto, o método CN desenvolvido pelo Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos (CN-SCS), atualmente chamado de Serviço de Conservação dos Recursos Naturais (NRCS), com base nas condições hidrológicas e pedológicas deste país, é hoje uma das técnicas mais aplicadas (MISHRA; SINGH, 2006, AJMAL et al. 2015), devido principalmente à sua simplicidade de aplicação.

Sua aplicabilidade a um evento específico chuva-deflúvio considerando sua forma original, pode ser questionável caso algumas considerações não sejam feitas, dado que, várias condições hidrológicas prévias influenciam na resposta da bacia a um evento específico, conforme constatado por Soulis e Valiantzas (2012), Sheeder et al. (2002), Espírito Santo et al. (2001) e Silveira et al. (2000). Isso porque a simples atribuição de um parâmetro constante, com base nas características físicas dos solos, cobertura vegetal e precipitação antecedente, pode ser prático, mas pode produzir erros de grandes magnitudes na estimativa do deflúvio.

Resultados anteriores mostram que, quando o valor do CN é determinado através de dados observados de precipitação e escoamento superficial direto, denominados aqui de eventos chuva-deflúvio, não é possível atribuir um único valor deste para a bacia como um todo, pois ele varia de evento para evento em um mesmo intervalo de precipitação considerado. Isso demonstra que o valor de CN a ser atribuído para a bacia é função de variáveis incontroláveis como intensidade e duração da precipitação, por exemplo. Além disto, existe ainda a inevitável influência da complexa variação espacial da cobertura e umidade do solo ao longo da bacia hidrográfica (SOULIS; VALIANTZAS, 2013), fazendo com que o cálculo de CN seja ainda mais dificultoso.

A aplicação de ferramentas que auxiliam no processo de determinação do CN, assim como métodos que melhoram a estimativa do escoamento superficial direto, é de primordial importância para a aplicabilidade deste método, destacando-se como exemplo, o uso de técnicas de geoprocessamento e o cálculo de CN através de eventos chuva-deflúvio observados.

Outro ponto importante na aplicação do método, e que tem sido discutido por vários autores, é a relação estabelecida entre a abstração inicial (I_a) e o armazenamento potencial de água no solo (S), sendo conhecido como coeficiente de abstração inicial (λ), o qual é preconizado pelo método CN-SCS como sendo igual a 0,2. Esta relação tem impacto significativo no resultado dos valores de deflúvio encontrados. Seu valor é dependente do relevo, da cobertura vegetal, e das condições climáticas da região (PONCE; HAWKINS, 1996).

Diante do exposto, objetiva-se neste trabalho, aplicar diferentes métodos de determinação do CN, e avaliar os resultados do escoamento superficial direto estimado com os valores observados através de 166 eventos de chuva-deflúvio separados para a bacia hidrográfica do Ribeirão Jaguara (BHRJ), inserida na região do Alto Rio Grande, MG.

Para isso, técnicas de geoprocessamento foram aplicadas para caracterização espacial do valor de CN, e métodos que calculam seu valor com base em eventos chuva-deflúvio observados foram utilizados, podendo-se definir qual método é o mais eficiente para a estimativa do escoamento superficial direto (Q).

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Importância e distribuição da água

Um dos elementos primordiais para a manutenção da vida é a água. Sua presença ocorre em todos os locais terrestres seja qual for o estado físico, e nos mais diversos ambientes, seja atmosférico, terrestre ou subterrâneo.

A água é de fato, um componente de extrema importância social e econômica, e por isso, se tornou o mais precioso de todos os recursos naturais (CARSON, 2010).

De acordo com Relatório Mundial das Nações Unidas sobre Desenvolvimento dos Recursos Hídricos (WWAP, 2016), metade da força de trabalho mundial está empregada em oito setores dependentes de recursos hídricos e naturais: agricultura, silvicultura, pesca, energia, manufatura com uso intensivo de recursos, reciclagem, construção e transporte. A gestão sustentável dos recursos hídricos, a infraestrutura hídrica, e o acesso ao abastecimento seguro, confiável e regular de água, bem como serviços adequados de saneamento, melhoram os padrões de vida, expandem as economias locais e levam à criação de empregos mais dignos e a uma maior inclusão social (WWAP, 2016).

Analisando a distribuição desse patrimônio no planeta, verifica-se que a água salgada, presente principalmente em mares e oceanos, corresponde a 97,5% do total, enquanto que a água doce que se encontra, basicamente, em rios, lagos e geleiras, corresponde a 2,5% do total de água do planeta (MELLO; SILVA, 2013).

O Brasil é o país do mundo que possui a maior quantidade de água doce, com 12% do total existente no planeta. É mais que todo o Continente Europeu

ou Africano, por exemplo, que detêm 7% e 10%, respectivamente (ROTHER, 2016).

Contudo, a distribuição espacial do volume de água disponível no Brasil é de certa forma, bastante heterogêneo, sendo que 81% estão concentrados na Região Hidrográfica Amazônica, onde está o menor contingente populacional, cerca de 5% da população brasileira e a menor demanda. Nas regiões hidrográficas banhadas pelo Oceano Atlântico, que concentram 45,5% da população do País, estão disponíveis apenas 2,7% dos recursos hídricos do Brasil (BRASIL, 2015).

Mesmo sendo um país privilegiado em quantidade de recursos hídricos facilmente disponíveis, é visível a escassez de água no Brasil, sobretudo em regiões específicas. Neste sentido, o país vem apresentando níveis baixos em seus reservatórios durante épocas do ano em que estes costumam estar bem mais elevados, fator que torna a escassez ainda mais crítica. Além disso, o expressivo aumento nas últimas décadas, das áreas irrigadas no país, faz com que o consumo de água por esse tipo de atividade em algumas regiões, chegue a aproximadamente a 75% da vazão total consumida (BRASIL, 2015).

Atualmente, a maioria dos governos e um grande número de agências e organizações destacam a água como prioridade, desenvolvendo políticas holísticas e sustentáveis de gerenciamento dos recursos hídricos, tomando como foco o emprego de fatores hidrológicos e ecológicos para a caracterização da disponibilidade hídrica (SILVA et al., 2006).

2.2 O ciclo hidrológico

O ciclo hidrológico é definido como sendo a dinâmica da água no meio ambiente sob seus diferentes estados físicos (sólido, líquido e gasoso) (MELLO; SILVA, 2013), ocorrendo simultaneamente nos três grandes reservatórios

existentes no globo terrestre: atmosfera, oceanos e continentes (SILVA et al., 2009).

Castro e Lopes (2001), definiram o ciclo hidrológico (Figura, 1) como sendo o caminho que a água percorre desde a evaporação no mar, passando pelo continente e voltando novamente ao mar, sendo então responsável pela renovação da água no planeta. Neste sentido, em escala global o ciclo hidrológico pode ser considerado como um fenômeno de circulação fechada, impulsionado principalmente pela radiação solar e pela gravidade.

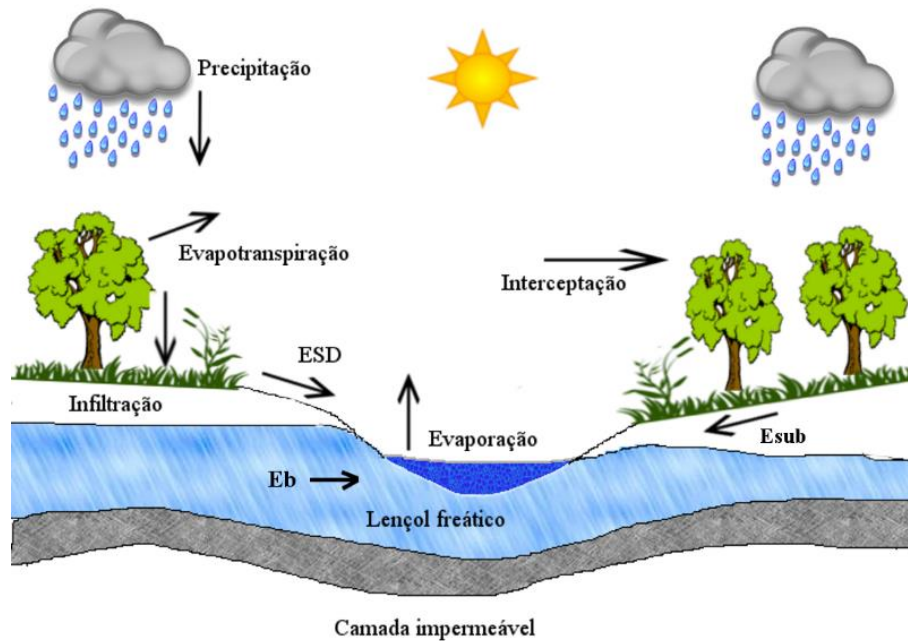


Figura 1 Principais componentes do ciclo hidrológico

A precipitação constitui-se no principal componente de entrada do ciclo hidrológico, sendo que todos os outros componentes estão intimamente relacionados com as características espaciais e temporais da precipitação, além dos fatores intrínsecos ao solo, vegetação e manejo local (SILVA et al., 2004).

A precipitação que atravessa a cobertura vegetal, ao atingir o solo, é dividida em duas parcelas: uma que infiltra no solo e outra que gera escoamento. A parcela que infiltra é de extrema importância, porque fornece água para as plantas por meio da fração que é retida pela matriz do solo, e a outra fração, não retida, recarrega os aquíferos reabastecendo as nascentes, sendo esta responsável direta pela manutenção do escoamento base na rede de drenagem ao longo dos períodos de estiagem (MELLO; SILVA, 2013).

A parcela que gera escoamento superficial direto, escoar pela superfície impulsionada pela gravidade, sendo a responsável pelo transporte de sedimentos, correspondendo, portanto, à fração da precipitação que pode provocar danos ao meio ambiente, resultando em perda de solo agricultável e insumos agrícolas. Além disso, sua intensificação pode provocar contaminação e assoreamento dos corpos d'água.

O escoamento superficial direto manifesta-se inicialmente na forma de pequenos filetes de água que se moldam sobre o relevo do solo, sendo impulsionado pela gravidade para as cotas mais baixas, vencendo principalmente o atrito com a superfície do solo. A presença de vegetação na superfície do solo reduz o impacto das gotas de chuva no solo e contribui para obstruir o escoamento superficial, favorecendo a infiltração em percurso e minimizando a erosão (SILVEIRA, 2007).

Parte da água que infiltra no solo, ou seja, a parcela que foi armazenada será absorvida pelas plantas, sendo utilizada nos seus diversos processos metabólicos, voltando, em seguida, à atmosfera, pelos estômatos das folhas das plantas, em um processo chamado transpiração (MELLO; SILVA, 2013). Já o fenômeno da evaporação é a passagem da fase líquida para a fase gasosa, e pode ocorrer a partir de uma massa contínua, como rios, lagos e mares, ou a partir de uma superfície úmida, como o solo.

A evaporação da água do solo e da superfície dos vegetais e a transpiração das plantas ocorrem simultaneamente na natureza, sendo difícil distinguir os dois processos. Assim, o termo evapotranspiração é utilizado para descrever o processo total de transferência de água do sistema solo-planta para a atmosfera (TUCCI et al., 2004).

A parcela do ciclo hidrológico associada à evapotranspiração é substancial, podendo superar a precipitação em determinadas regiões, sendo, portanto, de grande importância no ciclo hidrológico. Tem-se como exemplo, o planejamento de áreas agrícolas irrigadas ou de sequeiro, a determinação da necessidade de água das culturas, a construção e operação de reservatórios, que quando associada ao ganho de água através das precipitações, permite determinar a disponibilidade hídrica de uma região.

Ao analisar os componentes do ciclo hidrológico, fica evidente o papel do homem como usuário dos recursos naturais de uma bacia hidrográfica, que pode alterar significativamente a dinâmica do mesmo. Por exemplo, uma redução da capacidade de infiltração aumenta o escoamento superficial direto, diminui a infiltração, e também aumenta o potencial de geração da erosão e transporte de sedimentos (MELLO; SILVA, 2013).

Sendo assim, as ações antrópicas, são responsáveis diretas pela quantidade e intensidade do escoamento superficial direto gerado pela bacia hidrográfica, sendo o manejo inadequado do solo, o responsável pela redução da capacidade de infiltração do solo, aumentando o escoamento superficial direto, e diminuindo assim, a recarga dos aquíferos.

2.3 Modelagem chuva-escoamento superficial direto (ou chuva-deflúvio)

O conhecimento da variabilidade espaço temporal da vazão é de suma importância para a engenharia e o planejamento da disponibilidade hídrica, visto

que a oferta de água em um manancial condiciona o uso e a demanda pelos recursos hídricos na bacia hidrográfica. Essa variabilidade faz com que seja necessário a quantificação dos recursos hídricos por meio do monitoramento hidrológico.

As séries de dados hidrológicos são imprescindíveis para profissionais da área de recursos hídricos, pois permitem a tomada de decisões referente ao planejamento, aproveitamento e controle de recursos hídricos (NUNES, 2015).

Uma bacia pode ser considerada como um sistema que transforma chuva em vazão (ou deflúvio), sendo assim, a determinação de variáveis tais como, vazão de pico, volume do escoamento superficial direto de uma bacia e do hidrograma resultante de diferentes eventos de precipitação, é crucial na gestão de desastres naturais e no dimensionamento e construção de obras hidráulicas.

De acordo com Khaleghi et al. (2011), a ocupação humana vem sempre acompanhada por mudanças do espaço, sejam elas construções, retirada da vegetação, modificação dos cursos d'água etc. Estas ações antrópicas sobre a superfície de uma bacia hidrográfica influenciam diretamente no aumento da vazão de pico e no volume de escoamento da bacia (PAPPAS et al., 2008).

As estimativas de vazões máximas e de hidrogramas de projeto são necessárias para o manejo e gestão de bacias, assim como para predizer seu comportamento hidrológico. Contudo, os principais problemas vinculados a predições hidrológicas incluem a carência ou baixa precisão de dados de precipitação, alto custo de monitoramento, carência de informações sobre as bacias e a extensão de tempo requerida para obter os resultados (KHALEGHI et al., 2011; NUNES, 2015).

Diante do exposto, a aplicação de modelos hidrológicos do tipo chuva-deflúvio torna-se imprescindível, principalmente para a análise da disponibilidade de água em bacias hidrográficas. Considerando ainda um país como o Brasil, que apresenta grande escassez de dados fluviométricos,

especialmente em pequenas bacias, que se encontram em crescente processo de exploração, a aplicação de modelos se torna ainda mais imprescindível.

Todavia, uma das dificuldades na aplicação deste tipo de modelo é a necessidade de definir valores de parâmetros com base em séries observadas de chuva e de vazão (TUCCI, 2005), pois, somente após a calibração e validação destes parâmetros é que estes modelos poderão ser utilizados para o gerenciamento de recursos hídricos de uma determinada localidade.

Existem vários modelos chuva-deflúvio, mas um que é mundialmente utilizado na prática da engenharia e com um número razoável de informações disponíveis, é o modelo CN-SCS, desenvolvido pelo Serviço de Conservação do Solo (SCS) do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos da América (USDA), atualmente chamado de Serviço de Conservação dos Recursos Naturais (NRCS).

Inicialmente desenvolvido para uso em áreas agrícolas, atualmente tem sido objeto de estudo, desenvolvimento e aplicação também em áreas urbanas (TRAMBLAY et al. 2010).

Detalhes deste modelo serão descritos a seguir.

2.4 O escoamento superficial e seus componentes

2.4.1 Generalidades

Para o aproveitamento hídrico, dimensionamento hidráulico, e manejo de bacias hidrográficas, o escoamento superficial é o componente do ciclo hidrológico de maior importância. Por isso, é um dos mais estudados, observados e modelados na hidrologia (MELLO; SILVA, 2013).

O escoamento superficial abrange desde o excesso de precipitação que ocorre logo após uma chuva intensa e se desloca livremente pela superfície, até o

escoamento de um rio, que pode ser alimentado tanto pelo excesso de precipitação como pelas águas subterrâneas.

Sendo assim, o escoamento superficial total, ou simplesmente escoamento superficial, é composto de 3 componentes: escoamento superficial direto (Q), escoamento sub-superficial, e escoamento base ou subterrâneo. O primeiro componente é gerado por precipitações com intensidades maiores do que a capacidade de infiltração do solo escoando diretamente sobre a superfície. Esta parcela do escoamento é conhecida também como precipitação efetiva ou deflúvio superficial (MELLO; SILVA, 2013). Constitui-se de uma das mais importantes fases do ciclo hidrológico no que diz respeito ao dimensionamento de obras hidráulicas e manejo de bacias hidrográficas, por influenciar decisivamente no transporte de sedimentos e inundações.

Vários são os fatores que influenciam no escoamento superficial direto, sendo que estes podem ser de natureza climática, relacionados ao padrão de precipitação, ou de natureza fisiográfica, relativo às características da bacia. Dentre os fatores climáticos destacam-se a intensidade e a duração da precipitação, além da quantidade total de chuva ocorrida antes do evento considerado (umidade do solo antecedente). Neste contexto, as precipitações com origem convectiva (alta intensidade e curta duração) são de extrema importância para estudos de cheias em pequenas bacias hidrográficas ou áreas urbanas (MELLO; SILVA, 2013). Concernindo aos fatores fisiográficos, é dada uma atenção especial aos atributos e relevo dos solos, neste sentido, normalmente bacias que apresentam solos com maior permeabilidade proporcionam cheias de menor magnitude, pois sua alta taxa de infiltração reduz a parcela associada ao escoamento superficial direto (ou deflúvio).

Esse comportamento hidrológico, de maior ou menor permeabilidade da maioria dos solos tropicais, deve-se principalmente à sua estrutura propriamente dita, que caracteriza a sua capacidade de infiltração e resistência à erosão

(MELLO; SILVA, 2013). Em outros casos, a textura também tem importância sobre a infiltração do solo, uma vez que os solos com uma granulometria maior (textura média a arenosa) apresentam uma maior facilidade de infiltração da água no solo. Nesse contexto, alguns Latossolos, tais como os vermelhos, que são solos argilosos, porém, altamente intemperizados, apresentam uma alta capacidade de infiltração devido à sua estrutura granular, passando a apresentar um comportamento hidrológico semelhante a solos arenosos.

Ainda a respeito dos fatores fisiográficos, vários autores têm dado uma atenção especial ao relevo na caracterização do escoamento superficial direto. Solos com relevo mais acidentado tendem a provocar cheias com maiores volumes, além de aumentar a velocidade do escoamento superficial direto, o que, por sua vez, aumenta a taxa de erosão do solo. Em relevos mais movimentados, a ação da força gravitacional atuará sobre a parcela da precipitação que atingiu o solo, forçando-a a se movimentar com rapidez sobre o mesmo, impedindo assim, sua infiltração. Isso ocorre porque o processo de infiltração e de redistribuição da água no solo é regido pela ação de forças gravitacionais (água presente nos macroporos), e forças de capilaridade e adsorção (água retida na matriz do solo). O vetor da força gravitacional não é normal à superfície do solo, tendo sentido ao centro de gravidade da Terra. Portanto, caso o relevo seja acidentado, ou seja, com uma considerável declividade, a força gravitacional atuará na movimentação da água que se encontra na superfície do solo, e não atuará a favor da infiltração da água no solo.

O escoamento sub-superficial ocorre numa camada de solo saturada próxima à superfície, podendo contribuir e influenciar o próprio Q.

Por último, o escoamento base ou subterrâneo é aquele produzido pela drenagem natural dos aquíferos, com significativa importância do ponto de vista ambiental, uma vez que refletirá a capacidade de armazenamento de água da

bacia e sua transmissividade, com reflexos para a manutenção do escoamento durante o período de estiagem. Seu comportamento em termos dinâmico é relativamente lento, assemelhando-se ao decaimento de uma curva exponencial (MELLO; SILVA, 2013).

Denomina-se hidrógrafa ou hidrograma, a representação gráfica da vazão que passa por uma seção de controle em função do tempo. Embora uma hidrógrafa possa ser a representação das vazões médias diárias para um ano (também denominada fluviograma), também podem ser caracterizadas apenas para um evento de chuva isolado. No Gráfico 1, observa-se o comportamento das vazões ao longo do ano hidrológico 2011/2012 da bacia hidrográfica do Ribeirão Jaguara (BHRJ), que objeto deste estudo.

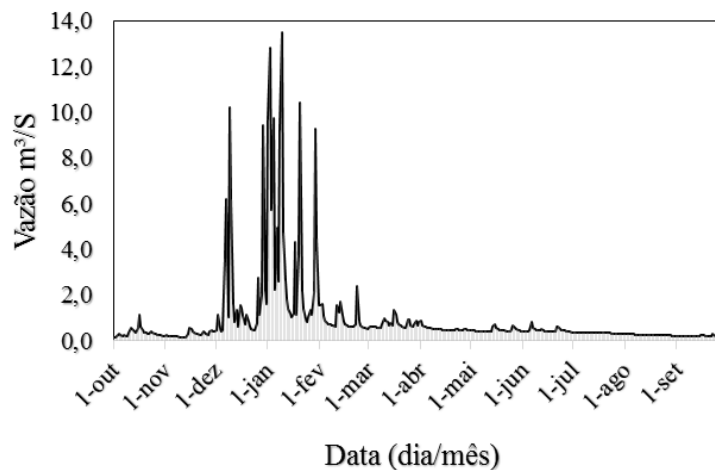


Gráfico 1 Hidrograma referente ao ano hidrológico 2011/2012 na BHRJ

O comportamento do hidrograma depende de vários fatores, sendo os principais: relevo, cobertura e forma da bacia, duração e distribuição espaço temporal da precipitação, condições do solo, e modificações artificiais na rede de drenagem (MELLO; SILVA, 2013).

2.4.2 Separação dos escoamentos numa hidrógrafa

Conforme mencionado anteriormente, o escoamento total que se manifesta no hidrograma é composto pelo escoamento superficial direto, escoamento sub-superficial e escoamento base ou subterrâneo. Entretanto, diante da dificuldade e das incertezas em se conseguir separar o escoamento superficial direto do escoamento base, e devido à parcela precipitada sobre o canal ser pequena, costuma-se considerar que o escoamento total do hidrograma é composto apenas pelos escoamentos superficial direto e subterrâneo (WILKEN, 1978). A variação nos valores de vazão que ocorre no escoamento superficial direto é muito maior do que aquela que ocorre nas vazões do escoamento subterrâneo.

Desta forma, fica evidente que as águas superficiais, pela sua maior velocidade de escoamento, preponderam na formação de enchentes, enquanto que a contribuição subterrânea pouco se altera, mesmo diante de grandes precipitações (PINTO et al., 1976). Portanto, verifica-se uma grande necessidade em separar estes dois processos no hidrograma, para que possa ser entendido e estimado o comportamento do escoamento superficial direto numa bacia hidrográfica, a fim de permitir inferir sobre as condições de manejo na mesma.

2.5 Método CN-SCS

2.5.1 Descrição do método

O Método CN-SCS (*Curve Number – Soil Conservation Service*) é um modelo chuva-deflúvio que consiste numa aproximação empírica entre um dado evento de chuva e as condições de superfície da bacia hidrográfica para estimativa do escoamento superficial direto (Q) ou deflúvio.

Foi originalmente desenvolvido para a estimativa do escoamento superficial direto (Q) gerado em uma bacia ou área de contribuição (MELLO; SILVA, 2013), estimando-se o armazenamento potencial de água no solo a partir da adoção de um parâmetro, conhecido como *Curve-Number* (CN). Este parâmetro, o qual reflete as condições de cobertura vegetal, atributos físico-hídricos do solo e condições de umidade antecedente, a qual é inferida com base na precipitação antecedente dos últimos 5 dias (GROVE et al., 1998; MACHADO, 2002; MISHRA; SINGH, 2003; MISHRA et al., 2004, 2005; JAIN et al., 2006^a).

O desenvolvimento deste método foi feito considerando pequenas bacias, sendo que para aplicações em áreas superiores a 250 km² é necessária uma subdivisão desta (PONCE; HAWKINS, 1996). Contudo, sabe-se que em vários estudos, o método tem sido aplicado para bacias maiores do que 250 Km², tais como em Jacobs e Sirinivasan (2005), Mishra et al. (2008b), D'Asaro e Grillone (2012), Deshmukh et al. (2013), Jeon et al. (2014) e Tessema et al. (2014).

O embasamento físico desse método pode ser explicado da seguinte forma (MELLO; SILVA, 2013):

$$\frac{\text{Volume infiltrado}}{S} = \frac{Q}{P} \quad (1)$$

Onde S é o armazenamento potencial de água pelo solo (mm), Q é o escoamento superficial direto (mm), e P é a precipitação que deu origem ao escoamento (mm).

Contudo, o embasamento descrito pela Equação 1 seria real se não houvesse perdas iniciais associadas à retenção de parte da precipitação antes do início do escoamento superficial direto (Q) propriamente dito. Essas perdas, chamadas de abstração inicial (Ia), estão associadas às depressões do terreno e a cobertura vegetal. Assim, pela Equação 1 e com a inserção da abstração inicial, a formulação geral do método é obtida por (TUCCI, 2001; GENOVEZ, 2001; MELLO; SILVA, 2013):

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

Através da Equação 2, é possível obter a equação geral do método para a estimativa do escoamento superficial direto (Q), que é estimado por (USBR, 1977):

$$Q = \frac{(P-Ia)^2}{P-Ia+S} \quad (3)$$

Em que:

Q é o escoamento superficial direto (mm);

P é a precipitação total (mm);

Ia é a abstração inicial da precipitação (mm);

S é o armazenamento potencial de água no solo (mm).

O método preconiza ainda que haja uma relação entre (Ia/S) da seguinte forma:

$$\lambda = Ia/S \quad (4)$$

$$Ia = \lambda . S \quad (5)$$

Sendo o coeficiente de abstração inicial (λ) uma constante de proporcionalidade da abstração inicial em relação ao armazenamento potencial de água pelo solo. Assim, observa-se que somente existirá escoamento quando P for superior às abstrações iniciais, e neste caso, a Equação 3 é reescrita para a seguinte forma:

$$Q = \frac{(P-\lambda S)^2}{P-\lambda S+S} \quad (6)$$

O SCS propôs uma relação linear entre as variáveis S e Ia estabelecendo λ igual a 0,20, e para esta situação, a Equação 3 se transforma em:

$$Q = \frac{(P-0,2S)^2}{(P+0,8S)} \quad (7)$$

Ponce e Hawkins (1996) comentaram que para justificar a equação acima, o SCS utilizou dados obtidos de diversas bacias hidrográficas dos Estados Unidos, dos quais, em 50 % dos pares de valores, os valores de λ variaram de 0,095 a 0,38, de acordo com o tipo de solo, cobertura vegetal, declividade do terreno, além das características intrínsecas à precipitação.

A estrutura deste método tem sido documentada com detalhes no *National Engineering Handbook* seção 4 (NEH-4) (HYDROLOGY, 1956, 1964, 1971, 1985, 1993, 2004), e descrições minuciosas também podem ser encontradas em Hawkins (1993), Steenhuis et al. (1995), Ponce e Hawkins (1996), Grove et al. (1998), McCuen (2002), Michel et al. (2005), Soulis et al. (2009) e Soulis e Valiantzas (2012).

Devido à sua simplicidade e consideração de vários outros fatores em um único parâmetro (CN), este método é um dos mais conhecidos por engenheiros e profissionais do ramo da hidrologia (MISHRA; SINGH, 2003, 2006, SOULIS et al. 2009), e por isso tem evoluído para além de seu escopo, sendo integrado em modelos de simulação hidrológica (SOULIS; VALIANTZAS, 2012).

Contudo, a aplicação do método CN-SCS considerando os parâmetros das documentações originais descritas no NEH-4, sem uma calibração baseada em eventos chuva-deflúvio, podem resultar em erros significativos na estimativa de Q (MISHRA; SINGH, 2003; AJMAL; KIM, 2014, GRUNWALD; NORTON 2000, JEON et al. 2014).

Muitos trabalhos têm sido elaborados para a melhoria do método, tais como Mishra e Singh (2003), Jain et al. (2006), Tramblay et al. (2010), Soulis e Valiantzas (2012) e Ajmal e Kim (2014). Em vários estudos elaborados em diferentes partes do globo, o valor de λ tem sido menor que 0,05, e este valor tem sido mais eficiente na estimativa de Q do que o valor proposto inicialmente de 0,2 (MISHRA et al., 2004; WOODWARD et al., 2003; D'ASARO; GRILLONE, 2012; YUAN et al., 2014).

Além desta consideração sobre os valores de λ , a acurácia da determinação dos valores de CN é extremamente importante na aplicação do método (MCCUEN, 2002), sendo, portanto, necessário a aplicação de diferentes métodos para sua determinação.

2.5.2 O armazenamento potencial de água no solo (S)

Como a abstração inicial foi inicialmente considerada como sendo uma parcela fixa de S, o parâmetro CN é associado apenas ao armazenamento potencial de água no solo, dado pela equação 8:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad 0 < CN \leq 100 \quad (8)$$

O valor adotado para CN, num primeiro instante, refere-se à umidade nas condições próximas à capacidade de campo, conhecida como CN_{II}.

Observa-se que para CN = 0, tem-se uma representação teórica de S tendendo ao infinito, em outras palavras, toda precipitação seria absorvida pelo solo e não haveria escoamento superficial direto. Para CN = 100, S será nulo e não haverá armazenamento de água pelo solo, resultando em que toda precipitação é convertida em escoamento superficial direto (MILIANI et al., 2011). No Gráfico 2, estas considerações são apresentadas.

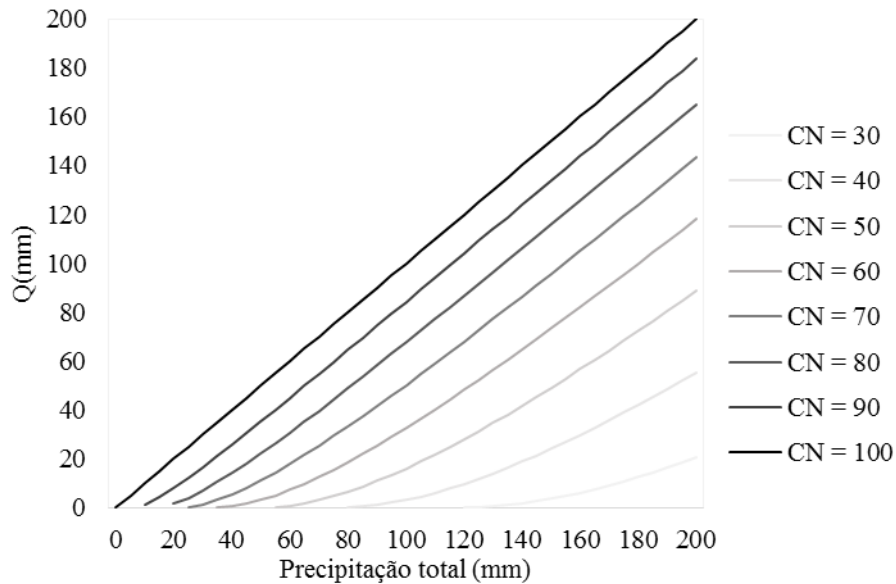


Gráfico 2 Volume de escoamento superficial direto (Q) estimado em função de P e de CN para $\lambda = 0,2$ e CNII

2.5.3 Condições de umidade antecedente

No Gráfico 2, observa-se que o CN representa uma curva média de infiltração que separa a parcela da precipitação que escoam superficialmente da que infiltra (SARTORI, 2004). Uma dispersão natural dos pontos em torno desta curva é interpretada pela medida da variabilidade espacial da umidade do solo. Sendo assim, a condição de umidade antecedente foi usada como um parâmetro representativo dessa variabilidade (PONCE; HAWKINS, 1996). Dessa forma, o SCS definiu três condições de umidade antecedente do solo (AMC I, II e III) com base na precipitação total ocorrida nos 5 dias antecedentes ao evento estudado (Tabela, 1).

Tabela 1 Precipitação ocorrida nos últimos 5 dias para a estimativa das condições de umidade antecedente

Precipitação acumulada nos 5 dias (mm)		
	Estação seca	Estação Úmida
AMC	(abril a setembro)	(outubro a março)
I	< 13	< 36
II	13 a 28	36 a 53
III	> 28	> 53

Fonte: Mello e Silva (2013)

- i. AMC I: condição em que os solos das bacias estão secos, com a umidade abaixo da capacidade de campo, ou precipitação acumulada nos últimos 5 dias menor que 36 mm para a estação de crescimento (estação úmida), e, em outro período, menor que 13 mm;
- ii. AMC II: solos com umidade próxima à capacidade de campo, sendo os valores de CN correspondentes aos da tabela desenvolvida pelo CN-SCS (Tabela, 3);
- iii. AMC III: solos com umidade acima da capacidade de campo, ou ocorreram precipitações nos últimos 5 dias, com o solo próximo da saturação, considerando o total precipitado maior que 53 mm para a estação úmida, e em outro período, maior que 28 mm.

Quando os solos se enquadram em AMC I, o CN deve ser corrigido (MACHADO, 2002; MELLO; SILVA, 2013):

$$CN_I = \frac{4,2 \cdot CN_{II}}{(10,0 - 0,058 \cdot CN_{II})} \quad (9)$$

Já quando estes são enquadrados em AMC III, o valor de CN deve ser calculado por:

$$CN_{III} = \frac{23 \cdot CNII}{10,0 + 0,13 \cdot CNII} \quad (10)$$

2.5.4 Classificação hidrológica dos solos

Como apresentado anteriormente, os valores de CN estão associados a diversos parâmetros fisiográficos da bacia tais como: cobertura vegetal, umidade do solo antecedente, e classe de solo. Nesta perspectiva, e para a aplicação do método CN-SCS, os solos devem ser agrupados em quatro categorias, seguindo classificação adaptada por Mello e Silva (2013).

- i. Grupo A: solos que produzem baixo escoamento e alta infiltração. Enquadram-se nesse grupo hidrológico, solos muito profundos (> 2,0m), com alta permeabilidade (seja pela textura ou estrutura do tipo granular) e baixa erodibilidade. Os Latossolos Vermelhos e Vermelho-Amarelo podem ser enquadrados nesse grupo;
- ii. Grupo B: são menos permeáveis do que os solos do grupo A, ou seja, apresentam um maior potencial em gerar escoamento. Argissolos e alguns Latossolos com horizonte A arenoso e B mais adensado podem ser enquadrados nesse grupo;
- iii. Grupo C: solos que geram escoamento superficial direto superior aos solos do grupo B. São solos moderadamente profundos (0,5 a 2,0 m), com baixa permeabilidade superficial e baixa resistência à erosão; Alguns solos com B textural e Cambissolos se enquadram nesse grupo.
- iv. Grupo D: solos pouco profundos, com baixa capacidade de infiltração e presença de argilas expansivas, tendo assim uma alta capacidade para a geração de escoamento. São solos com a camada de impedimento próximo ao horizonte A, sem horizonte B definido, e com alta

vulnerabilidade à erosão. Neossolos Litólicos e alguns Cambissolos podem ser exemplos desse grupo hidrológico.

Segundo McCuen (1989), os grupos hidrológicos dos solos podem ser identificados usando-se três formas: características dos solos, levantamento de solos locais, ou pela infiltrabilidade básica (IB). Os valores de IB para os quatro grupos hidrológicos dos solos estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 Infiltrabilidade básica do solo (IB) para identificação do grupo hidrológico

Grupo Hidrológico dos Solos	IB mm.h⁻¹
A	8,0
B	4,0 < IB < 8,0
C	1,0 < IB < 4,0
D	< 1,0

Fonte: Mello e Silva (2013)

No Brasil, existem também algumas propostas de classificação hidrológica dos solos. Setzer e Porto (1979) enquadraram 41 tipos de solos, levantados no estado de São Paulo, em doze zonas ecológicas, as quais possuem cinco grupos de solo determinados conforme sua natureza física e tipo de perfil.

Outra classificação relevante é a do trabalho de Lombardi-Neto et al. (1989), em que foram estabelecidos quatro grupos de solos de acordo com seu funcionamento hídrico e erosivo, visando sua aplicação em práticas conservacionistas (GONÇALVES, 2007).

2.5.5 Determinação dos valores de CN

Após a devida identificação dos grupos hidrológicos dos solos presentes no local de estudo, utilizam-se as tabelas a seguir para a determinação dos valores de CN. No caso de haver mais de uma classe ou cobertura de solo, deve-

se, posteriormente, ser feita uma média ponderada para se encontrar um valor médio representativo para a bacia.

Na Tabela 3 são apresentados os valores de CN para os complexos hidrológicos solo-cobertura, sendo estes para a condição II de umidade antecedente e $\lambda = 0,2$. Conforme já foi mencionado, caso o solo esteja dentro das condições I e III de umidade, deverão ser aplicadas as Equações 9 e 10, respectivamente, para se encontrar os novos valores de CN a serem atribuídos.

Tabela 3 Valores de CN a serem atribuídos para $\lambda = 0,2$ e AMC II (continua...)

Uso do Solo	Superfície	Grupo Hidrológico			
		A	B	C	D
Solo lavrado	- com sulcos retilíneos	77	86	91	94
	- em fileiras retas	70	80	87	90
Plantações regulares	- em curvas de nível	67	77	83	87
	- terraceamento em nível	64	76	84	88
	- em fileiras retas	64	76	84	88
Plantações de cereais	- em curvas de nível	62	74	82	85
	- terraceamento em nível	60	71	79	82
	- em fileiras retas	62	75	83	87
Plantações de legumes	- em curvas de nível	60	72	81	84
	- terraceamento em nível	57	70	78	89
	- pobres	68	79	86	89
	- normais	49	69	79	94
	- boas	39	61	74	80
Pastagens*	- < 50%	68	79	86	89
	- 50-75%	49	69	79	84
	- > 75%	39	61	74	80
Campos permanentes	- normais	30	58	71	78
	- esparsos, baixa transpiração	45	66	77	83
	- normais	36	60	73	79
	- densas, alta transpiração	25	55	70	77

Uso do Solo	Superfície	Grupo Hidrológico			
		A	B	C	D
Chácaras	- normais	56	75	86	91
	- ruins	72	82	87	89
	- de superfície dura	74	84	90	92
Florestas	- muito esparsas	56	75	86	91
	- esparsas	46	68	78	84
	- densas, alta transpiração	26	52	62	69
	- normais	36	60	70	76
Espaços abertos (parques, cemitérios, etc.)	-cobertura com grama < 50%	68	79	86	89
	-cobertura com grama de 50-75%	49	69	79	84
	-cobertura com grama > 75%	39	61	74	80
Áreas impermeáveis	- estacionamento	98	98	98	98
	- pavimentadas com coletores de enxurradas	98	98	98	98
Ruas e estradas	- pavimentadas e canais coletores abertos	83	89	92	93
	- estradas cascalhadas	76	85	89	91
	- estradas de terra	72	82	87	89
Áreas urbanas	- comerciais	89	92	94	95
	- industriais	81	88	91	93
Áreas residenciais*	- 65%	77	85	90	92
	- 38%	61	75	83	87
	- 30%	57	72	81	86
	- 25%	54	70	80	85
	- 20%	51	68	79	84
	- 12%	46	65	77	82
	- lotes urbanos	77	86	91	94

* % de cobertura da área (conclusão)

Fonte: (SCS 1956, 1964, 1971, 1985, 1993, 2004), adaptados de Huffman et al. (2011), e Mello e Silva (2013)

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da bacia hidrográfica do ribeirão Jaguara (BHRJ)

Este trabalho foi desenvolvido na bacia hidrográfica do ribeirão Jaguara (BHRJ), representativa da mesorregião Campo das Vertentes, na qual vem sendo conduzido monitoramento hidrológico e climático desde 2006. A bacia está inserida na Unidade de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos do Alto Rio Grande (UPGRH - GD1), Minas Gerais. Na Figura 2, apresenta-se a localização geográfica da mesma.

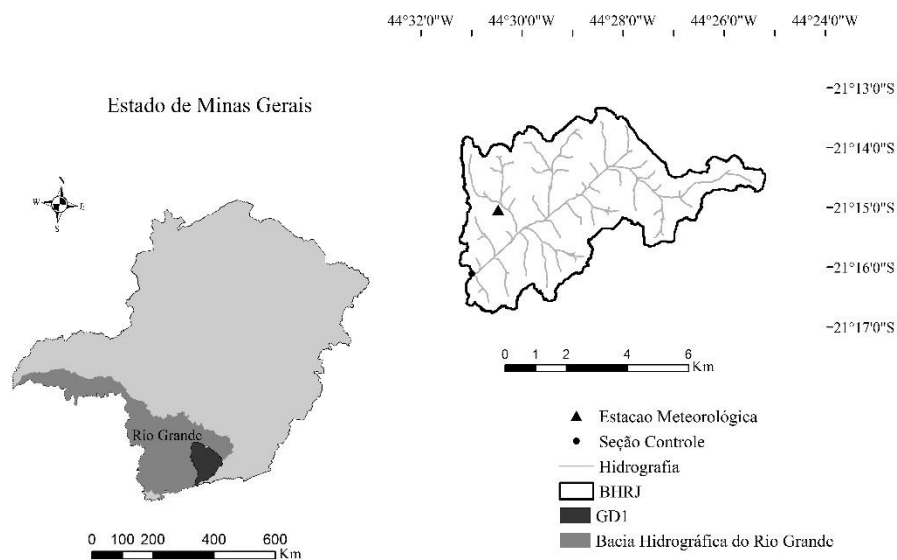


Figura 2 Localização da BHRJ inserida no contexto da bacia hidrográfica do Rio Grande e do Estado de Minas Gerais

Sua área de aproximadamente 3312 hectares é distribuída nos territórios dos municípios de Conceição da Barra de Minas (3% da área da bacia), São João

Del-Rei (90% da área da bacia), e Nazareno (7% da área da bacia). Está localizada entre as coordenadas 21°13'45" e 21°17'22" de latitude Sul e 44°31'00" e 44°24'55" de longitude oeste (Figura, 2) com altitudes que variam 959 a 1069 metros (Figura, 3), drenando diretamente para o reservatório da Usina Hidrelétrica de Camargos/CEMIG.

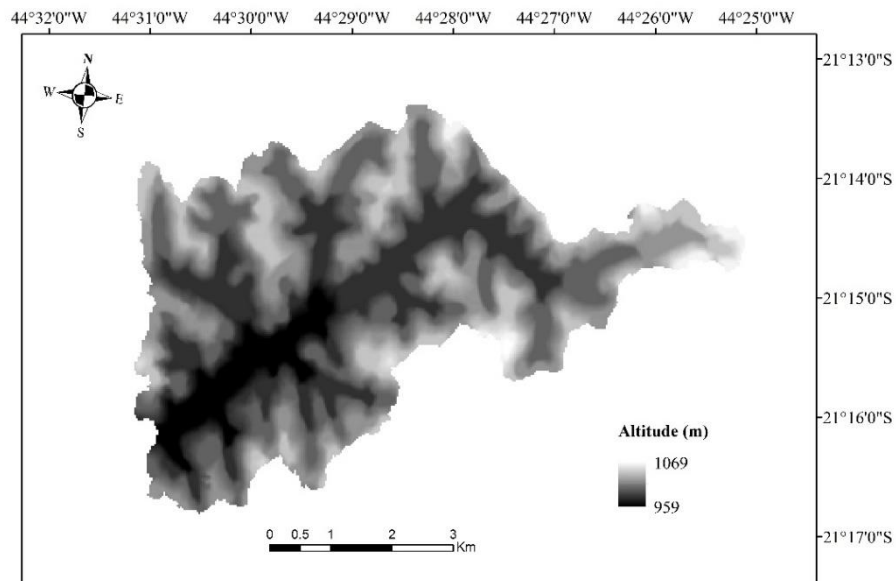


Figura 3 Modelo Digital de Elevação da BHRJ

O relevo da BHRJ, obtido através de um Modelo Digital de Elevação (MDE) com resolução espacial de 30 metros e baseado em imagens ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer), apresentou declividades consideravelmente íngremes em alguns trechos da bacia, com uma declividade máxima de 41,3%, sendo que seu valor médio foi de 9,5% (Figura, 4) (BESKOW, 2009).

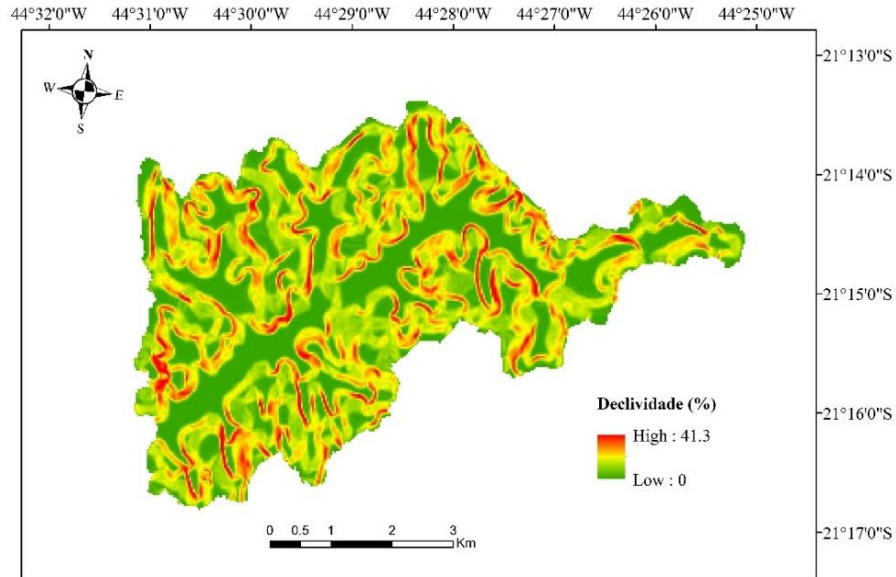


Figura 4 Distribuição dos valores de declividade na BHRJ

De acordo com a classificação de Köppen, o clima é caracterizado como Cwa, tendo como características verões quentes e úmidos e invernos frios e secos. O regime pluvial é caracterizado pela concentração da precipitação durante a primavera e o verão (outubro a março), com uma média de precipitação anual de 1542 mm para os 10 anos de dados observado. A temperatura média anual é de 19°C, com a média das mínimas e das máximas, respectivamente iguais a 14°C e 22°C, (MELLO et al., 2008).

A classe de solos predominante é a dos Latossolos que ocupam uma área de 61,8% da bacia, com destaque para o Latossolo Vermelho Distrófico Típico e Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico Típico, sendo a concentração de argila e a alta porosidade características marcantes destes solos, os quais foram observados em áreas com declividades inferiores a 18% (ARAUJO, 2006).

O Cambissolo Háplico Tb Distrófico ocupa uma área de 29,8% da bacia, e se encontra predominantemente na cabeceira. Estes solos têm como

características peculiares a sua localização em áreas mais movimentadas do relevo, maiores concentrações de *silte* e baixa profundidade. Pode-se observar pelas Figuras 4 e 5 que sua presença ocorre em locais com maiores declividades. Verificou-se também, que esses solos não estão ocupados por uma cobertura vegetal consistente, sendo, normalmente de pastagens extensivas, com exposição considerável do solo (ANDRADE et al., 2013).

Por último, encontra-se o Neossolo Flúvico, que corresponde a 8,4% da área, estando localizado ao longo das principais redes de drenagem onde a paisagem tem topografia suave, uma vez que sua origem está associada à deposição de sedimentos oriundos de inundações. Na Figura 5 está representada a distribuição das classes de solos da BHRJ (BESKOW, 2009).

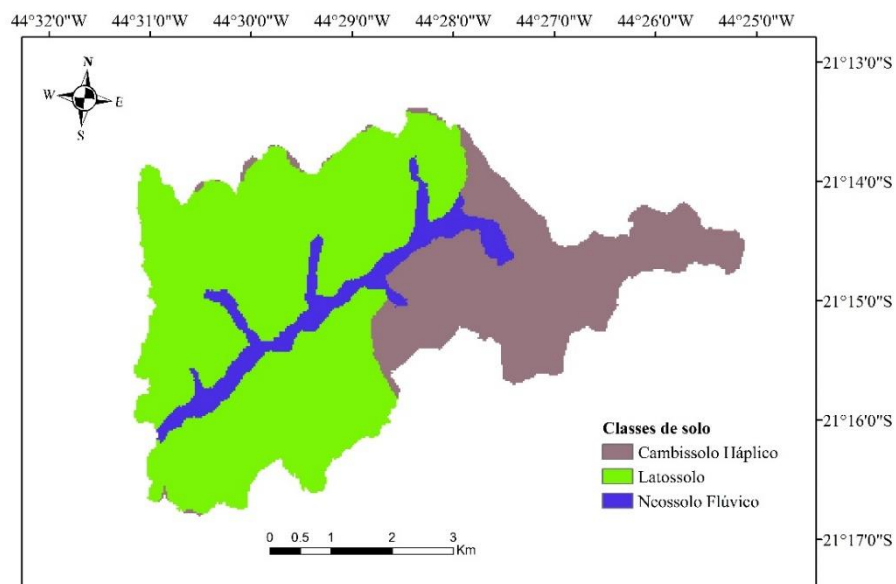


Figura 5 Distribuição das classes de solo na BHRJ
Fonte: Adaptado de Beskow (2009) e Araujo (2006)

Para o mapeamento do uso e ocupação do solo foram utilizadas imagens orbitais do satélite RAPIDEYE de 2014, com resolução espacial de 5 metros, sendo que as classes utilizadas na classificação do uso do solo foram: área

urbana, pastagem, vegetação nativa (floresta), solo exposto, agricultura e eucalipto.

O método de classificação aplicado para obter o mapa de uso e cobertura do solo foi o supervisionado. Considerando que a criação de mapas categóricos representa uma simplificação da realidade, estes podem apresentar erros de classificação e, por isso, a determinação da acurácia torna-se imprescindível para avaliar a qualidade do mapa produzido. Sendo assim, para avaliar a precisão do mapeamento, foi obtida a matriz de erros (também denominada matriz de confusão). Esta fornece o Coeficiente Kappa e a Exatidão Global, os quais correspondem a parâmetros que determinam a acurácia e a qualidade do mapeamento temático produzido (RODRIGUES et al., 2015). Contudo, ao final da classificação, devido à dificuldade em se distinguir solo exposto de uma área que estava sendo preparada pelo cultivo convencional, onde o solo fica exposto somente após a aração e o gradeamento, este foi classificado manualmente para toda a bacia tendo como base imagens de datas que diferem daquelas próximas ao cultivo do solo.

Nesta perspectiva, a BHRJ apresentou como característica marcante o desenvolvimento de atividades agropecuárias, onde se verifica o predomínio da pecuária extensiva, que é representada pela presença de pastagens (38,5%); agricultura, principalmente a cultura do milho e do trigo (30,9%); e eucalipto (10,3%); ou seja, 79,7% de toda a área da BHRJ é gerida por atividades relacionadas a agropecuária.

Os outros 20,3% estão distribuídos entre solo exposto, que está presente em 4,9% de toda a área, floresta nativa (15,1%), e área urbana com 0,3%. O mapa de uso do solo está representado na Figura 6.

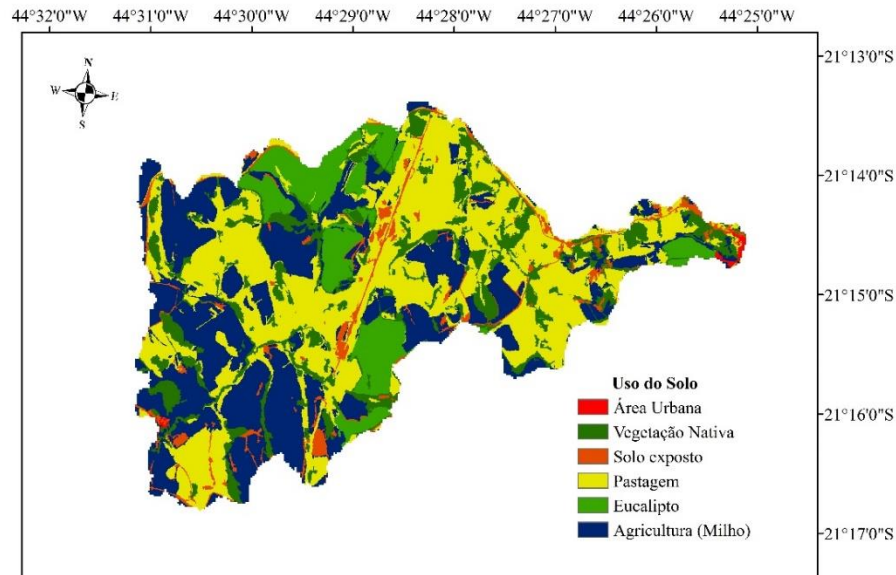


Figura 6 Distribuição das classes de uso do solo na BRHJ

3.2 Monitoramento hidrológico e meteorológico

O monitoramento hidrológico e meteorológico da BHRJ vem sendo conduzido desde 2006, de acordo com os escopos dos projetos de Pesquisa & Desenvolvimento (P&D 076 e 176), cujo objetivo principal foi identificar o potencial de recarga de água subterrânea nas bacias estudadas, sendo estes apoiados pela CEMIG/ANEEL (SILVA; MELLO, 2011).

Para a obtenção dos dados meteorológicos, há na bacia uma estação compacta automática da marca Campbell, modelo *WeatherHawk* (Figura, 7). As variáveis meteorológicas: temperatura, umidade relativa do ar, velocidade e direção do vento, radiação solar e precipitação foram monitoradas em intervalos de tempo de 30 minutos, para todos os anos de registros, 2006 a 2016.



Figura 7 Estação meteorológica compacta localizada na BHRJ

Para a obtenção dos dados de vazão, inicialmente foi conduzido o monitoramento linimétrico através do uso de um linígrafo automático configurado para realizar registros em intervalos de 30 minutos, localizado na seção controle da BHRJ (Figura, 8). Com base em curva-chave ajustada, considerando todos os anos de monitoramento, os dados de lâmina foram convertidos em vazão, constituindo-se então nos hidrogramas de escoamento propriamente ditos. A Equação 11, assim como o Gráfico 3, apresentam a curva chave ajustada para a seção controle da BHRJ.



Figura 8 Seção controle do ribeirão Jaguará, juntamente com a estrutura de abrigo e instalação do linígrafo

$$V = 0,000607 \times (H + 6,745)^{1,8621} \quad (R^2 = 0,86) \quad (11)$$

Em que H é lâmina registrada pelo linígrafo, em centímetros, e V é a vazão obtida (m³/s).

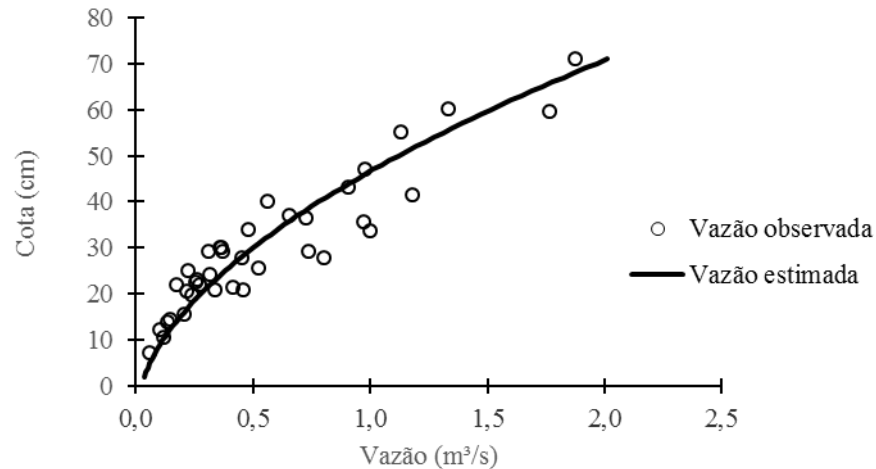


Gráfico 3 Curva chave ajustada para a seção controle da BHRJ

3.3 Determinação do hidrograma de escoamento superficial

Após a obtenção das hidrógrafas e respectivos hietogramas, os eventos para análise foram então escolhidos, totalizando 166 eventos chuva-deflúvio para a BHRJ entre os anos de 2006 e 2016, com exceção ao ano de 2010, para o qual não houve monitoramento devido a problemas com o linígrafo.

Alguns aspectos foram levados em consideração para a escolha destes, como por exemplo: precipitação maior ou igual a 10 mm, eventos separados com pelo menos 6 horas (SOULIS; VALIANTZAS, 2013); e, por último, considerou-se a forma com que a hidrógrafa se apresentou, sendo escolhidas aquelas nas quais o comportamento do escoamento superficial direto pôde ser devidamente captado, com os parâmetros tempo de ascensão e recessão evidentes bem como uma vazão de pico.

O escoamento superficial direto pode ser separado através de vários procedimentos, sendo mais usados aqueles baseados nas inflexões A e C da

hidrógrafa, considerando comportamento linear do escoamento base entre estes pontos. Além disto, modela-se o escoamento subterrâneo com base no modelo de Maillet (Equação, 12) (CASTANY, 1967), que consiste em um decaimento exponencial para identificação da inflexão C (GRÁFICO 4).

$$Q_t = Q_{t_0} \cdot \exp[-\alpha(t-t_0)] \quad (12)$$

Em que Q_t é a vazão de escoamento base no tempo t (L^3T^{-1}); Q_{t_0} é a vazão no tempo t_0 (L^3T^{-1}); α é o coeficiente de recessão, representa a taxa de decaimento da vazão com o tempo (T^{-1}) (sendo função da permeabilidade do solo e das características do fluído) e t_0 é o Dia Juliano correspondente ao início do período de depleção do escoamento subterrâneo e t é o Dia Juliano de interesse, sendo que $t \geq t_0$.

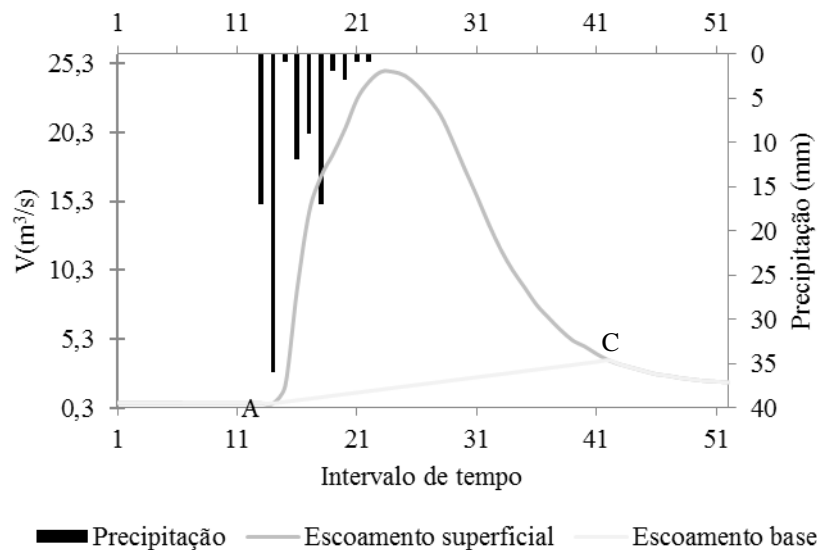


Gráfico 4 Representação do hietograma e hidrógrafa utilizada para a separação do escoamento superficial direto do escoamento base para um evento isolado

3.4 Análise da abstração inicial

Com os totais precipitados para cada tempo de coleta previamente estabelecidos (30 min), foram construídos os respectivos hietogramas de cada evento, os quais foram utilizados para a caracterização da abstração inicial (Ia).

A variável Ia, de acordo com Mishra et al. (2006), é definida como sendo o total precipitado entre o início da precipitação e o início do escoamento superficial direto. O Gráfico 5 representa a obtenção da abstração inicial (Ia) a partir da combinação hietograma-hidrograma, conforme metodologia apresentada por Mello et al. (2003) e Woodward et al. (2003).

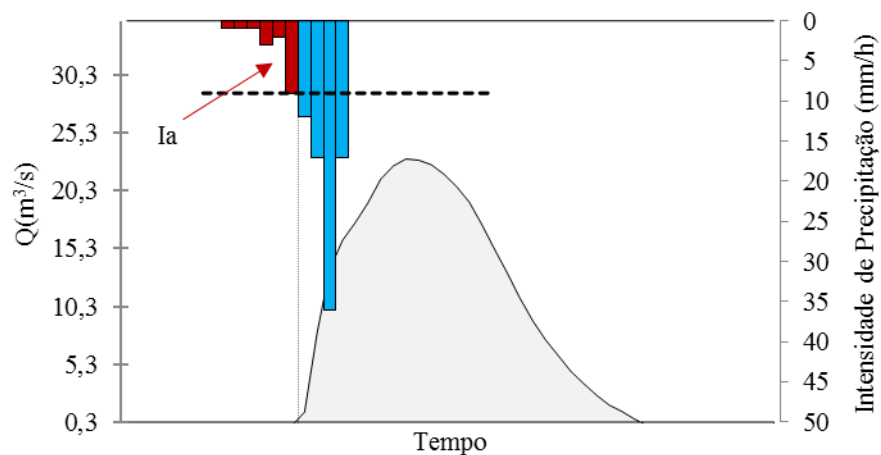


Gráfico 5 Representação da obtenção da abstração inicial e do armazenamento potencial de água no solo
Fonte: Adaptado de Woodward et al. (2003)

Com o escoamento superficial direto (Q) previamente determinado pela separação no hidrograma, determina-se a parcela do hietograma que teoricamente foi convertida em escoamento superficial direto (deflúvio). A partir daí, verifica-se o início do escoamento superficial direto, e por definição, toda

precipitação ocorrida antes deste, é considerada como sendo abstração inicial, sendo que, quanto menor o intervalo de tempo de monitoramento, maior a precisão desta análise.

3.5 Determinação do parâmetro CN (*Curve Number*) para a BHRJ

Os valores de CN para uma bacia hidrográfica podem ser determinados a partir das características fisiográficas da mesma através da utilização de tabelas, conforme foi apresentado anteriormente na descrição do método, ou através de dados de chuva-deflúvio observados (AJMAL; KIM, 2015). Como exemplo, têm-se as metodologias propostas por Hawkins (1993) e Soulis e Valiantzas (2013), as quais serão apresentadas na sequência.

Neste trabalho, 29 métodos foram utilizados para o cálculo de CN para a BHRJ. Tais procedimentos foram baseados em métodos diretos, em que os valores de CN foram derivados das tabelas do *National Engineering Handbook Section 4 (NEH-4)* (SCS 1956, 1964, 1971, 1985, 1993, 2004) para as diferentes condições de umidade antecedente, e métodos indiretos, em que se utilizam dados de eventos chuva-deflúvio observados para a modelagem de um valor de CN médio e representativo para toda a bacia. Para tal, ferramentas computacionais foram utilizadas no cálculo, bem como na espacialização dos valores de CN na bacia hidrográfica.

Os valores de CN obtidos através da espacialização dos dados e através dos eventos observados foram aplicados na equação original do método CN-SCS para a estimativa do escoamento superficial direto (Q), sendo que, a avaliação de qual o melhor método, foi feita baseando-se em três estatísticas de precisão.

Na Tabela 4 encontra-se um resumo que tem como objetivo dar uma ideia inicial de todos os métodos apresentados na sequência, sendo que um detalhamento minucioso dos mesmos pode ser visto na sequência.

Tabela 4 Resumo dos 29 métodos e sequência de aplicação das equações para determinação dos valores de CN para a BHRJ

Método	Obtenção CN	λ	Sequência das equações
M1	Mapa	0,20	13, 8 e 6
M2	Mapa	0,05	13, 15 e 14
M3	Média	0,02	17, 18, 8 e 6
M4	Moda	0,02	--
M5	Mediana	0,02	--
M6	Média	0,20	21, 8 e 6
M7	Moda	0,20	--
M8	Mediana	0,20	--
M9	Média	0,02	24, 8 e 6
M10	Moda	0,02	--
M11	Mediana	0,02	--
M12	Média	0,05	24, 14, 8 e 6
M13	Moda	0,05	--
M14	Mediana	0,05	--
M15	Assintótica	0,20	24, 25, 8 e 6
M16	Assintótica	0,05	--
M17	Assintótica	0,02	--
M18	Assintótica P > 60 mm	0,20	--
M19	Assintótica P > 60 mm	0,05	--
M20	Assintótica P > 60 mm	0,02	--
M21	Two CN model	0,20	24, 8, 5, 28, 29, 30, 31, 32, 27, 8 e 6
M22	Two CN model	0,05	24, 8, 5, 28, 29, 30, 31, 32, 24, 8 e 6
M23	Two CN model	0,02	--
M24	Two CN model P > 60 mm	0,20	24, 8, 5, 28, 29, 30, 31, 32, 27, 8 e 6
M25	Two CN model P > 60 mm	0,05	24, 8, 5, 28, 29, 30, 31, 32, 24, 8 e 6
M26	Two CN model P > 60 mm	0,02	--
M27	Heterogêneo	0,20	24, 13, 34, 35, 36, 33, 8 e 6
M28	Heterogêneo	0,05	--
M29	Heterogêneo	0,02	--

3.5.1 Mapeamento dos valores de CN derivados da tabela NEH-4

Os valores de CN obtidos através das características da BHRJ (classe de solo, uso do solo, e condições de umidade antecedente), foram espacializados com o auxílio dos programas Microsoft Office Excel e ArcGIS. Este valor posteriormente foi utilizado para a estimativa do escoamento superficial direto 'Q' considerando dois valores de λ , onde, através de índices estatísticos foi avaliado qual o melhor valor de λ a ser considerado na estimativa de Q quando se determina CN através dos valores derivados das tabelas do NEH-4. O método para $\lambda = 0,2$ foi denominado M1, e para $\lambda = 0,05$, M2. Ambos estão descritos a seguir.

Inicialmente foi realizada a classificação hidrológica dos solos onde levou-se em consideração a Tabela 2. Contudo, por se tratar de uma bacia que é objeto de pesquisa por algum tempo, além dos valores de infiltrabilidade básica apresentados na Tabela 2, alguns parâmetros físico-hídricos de cada solo também foram considerados para o enquadramento dentro dos grupos hidrológicos. O Latossolo e o Cambissolo foram enquadrados nos grupos A e C, respectivamente. Sartori (2004) enquadrou estes solos nos mesmos grupos hidrológicos.

Tratando-se do Neossolo Flúvico, que é um solo profundo, com sua formação oriunda da sobreposição de camadas de sedimentos aluviais, e que devido isso apresenta uma variabilidade muito alta em suas características físicas, químicas e morfológicas (SANTOS et al., 2013), seu enquadramento em um grupo hidrológico com base apenas na capacidade de infiltração é dificultado. Por isso, duas considerações foram feitas a respeito deste solo para seu enquadramento.

Primeiramente, sabe-se que estes solos no geral ocorrem em ambientes de várzeas, planícies fluviais, e ao longo da rede de drenagem, assim, pode-se

presumir que o lençol freático esteja próximo da superfície, gerando desta forma, alto escoamento superficial direto, devido às condições de saturação do solo. Contudo, como sua topografia plana dificulta a geração do escoamento superficial direto, diferentemente das vertentes, este solo foi enquadrado no grupo hidrológico C, conforme descrito também por Sartori (2004).

Além desta classificação hidrológica dos solos, deve-se atentar também para as condições de superfície na qual a cobertura do solo está associada e ao tipo de manejo do solo e práticas conservacionistas existentes na bacia, verificando se há ou não a existência de curvas de nível, terraceamento, bem como outras técnicas de manejo.

Sendo assim, para a obtenção de um valor de CN, tendo como base a Tabela 3, as seguintes considerações foram tomadas: a vegetação nativa foi considerada como florestas normais, a agricultura como plantações de cereais em curva de nível; a pastagem com uma superfície de cobertura menor do que 50% por se tratar de uma pastagem extensiva; o eucalipto como florestas esparsas; o solo exposto como solo lavrado e com sulcos retilíneos; e por último, para a área urbana, considerou-se como sendo áreas residenciais com 65% de cobertura. Com as atribuições aqui descritas, e com a utilização da Tabela 3, foram obtidos os valores de CN.

Para a adoção de um valor CN médio representativo da BHRJ utilizou-se do sistema de informações geográficas que, por meio do uso do software ArcGIS, foi realizado uma combinação entre os mapas de uso e classes de solos, gerando assim um mapa de CN para a BHRJ. A combinação dos mapas gerou onze diferentes valores de CN, dos 12 possíveis (2 grupos hidrológicos de solo com 6 diferentes usos). A única combinação inexistente foi entre o grupo hidrológico A com área urbana, uma vez que esta classe se encontra somente sobre o Cambissolo.

A obtenção de um único valor de CN representativo para toda a bacia foi feito através da média ponderada calculada pela Equação 13 abaixo, e com a aplicação das equações 9 e 10, foram obtidos os valores de CN para as condições I e III de umidade antecedente (AMC I e AMC III).

$$CN_{tab} = CN_{II} = \frac{1}{A_T} \sum_{i=1}^n (A_i \times CN_i) \quad (13)$$

Em que, A_i é a área correspondente a cada valor de CN, CN_i é o valor de CN considerado, n é o número de valores de CN existentes na bacia, e A_T é a área total.

Woodward et al. (2003) identificaram através de modelos e ajustes pelo método dos mínimos quadrados, que considerar $\lambda=0,05$ apresenta uma melhor aproximação dos dados do que considerar um $\lambda=0,2$, conforme foi proposto inicialmente pelo método CN-SCS. Para isso, os autores realizaram estes estudos em 307 bacias hidrográficas, e verificaram que em 252 delas o resultado se aproximou melhor do que quando se considera $\lambda = 0,2$. Sendo assim, para $\lambda=0,05$, a equação 6 resulta em:

$$Q = \frac{(P-0,05S)^2}{(P+0,95S)} \quad P \geq 0,05S \quad (14)$$

Contudo, o valor de S a ser atribuído nesta equação não é o mesmo quando se considera um $Ia = 0,2S$, pois os valores apresentados na Tabela 3 foram calculados para esta relação. Sendo assim, Woodward et al. (2003) propuseram uma equação para converter o $S_{0,2}$ (mm) para $S_{0,05}$:

$$S_{0,05} = 0,8187S_{0,2}^{1,15} \quad (15)$$

De forma similar, o valor de $CN_{0,05}$ a ser atribuído foi ajustado através dos valores de $CN_{0,2}$ com base na seguinte equação:

$$CN_{0,05} = \frac{53,23}{\left[\left(\frac{100}{CN_{0,2}} - 1 \right)^{1,15} + 0,5323 \right]} \quad (16)$$

A metodologia descrita por Woodward et al. (2003) foi aplicada para a BHRJ considerando o valor de CN obtido através da aplicação da Equação 13, com o propósito de averiguar o valor de λ considerado para a BHRJ.

3.5.2 Determinação média do CN através de dados observados (λ , Q e P_5)

Reorganizando a Equação 3, deixando como incógnita (S), e dispondo agora dos valores de escoamento superficial direto (Q), precipitação total (P) e abstração inicial (Ia), é possível obter o armazenamento potencial de água no solo (S) para cada evento através da equação 17. Assim, para cada Ia determinado, há um correspondente S, gerando valores entre a relação Ia/S para cada evento.

$$S = \frac{(P-Ia)^2 - Q(P-Ia)}{Q} \quad (17)$$

Em que P é a precipitação total (mm), Q é o escoamento superficial direto (mm), e Ia é a abstração inicial da precipitação (mm) para cada um dos 166 eventos.

Com os valores de S, calculam-se os respectivos valores de CN com base na equação 18, com o valor de CN isolado no primeiro termo em substituição ao S:

$$CN = \frac{25400}{254+S} \quad 0 < CN \leq 100 \quad (18)$$

Desta forma, foram obtidos 166 valores de CN. Em termos médios, devido à alta variação dos valores obtidos, não é possível aplicar apenas um valor de CN que consiga representar todos os valores obtidos. Contudo, com o objetivo de diminuir essa alta variação dos valores de CN, foi considerada a umidade antecedente a cada evento com base na precipitação dos 5 últimos dias.

Considerando a Tabela 1, cada evento foi classificado em uma das três classes de umidade antecedente, CN_I , CN_{II} e CN_{III} . Assim, para posterior estimativa do escoamento superficial direto de um dado evento chuva-deflúvio, foi considerada a condição de umidade antecedente (AMC) a que este esteja vinculado. Para os eventos enquadrados na condição I, ou seja, para precipitações acumuladas antecedentes menores do que 13 mm para o período de dormência (abril a setembro), e menor que 36 mm para o período de crescimento (outubro a março); foram utilizados os valores de CN encontrados para esta mesma condição. Contudo, para os eventos que se enquadraram na AMC III, ou seja, com precipitações acumuladas antecedentes maiores que 28 mm para o período de dormência (abril a setembro), e maiores que 36 mm para o período de crescimento (outubro a março), foram utilizados os valores de CN encontrados para a mesma.

Sendo assim, após os 166 valores de CN obtidos e sua respectiva atribuição dentro de uma determinada classe de umidade antecedente, fez-se então os cálculos de CN_I , CN_{II} , ou CN_{III} , com base na moda, média e mediana para cada condição, obtendo-se assim 3 valores para CN_I , 3 para CN_{II} e 3 valores para CN_{III} . O fato de se considerar essas três medidas de tendência central, e não somente a média dos mesmos, é que não se sabe se os valores de CN apresentam uma distribuição normal.

Por fim, para a estimativa do escoamento superficial direto (Q) através da aplicação da Equação 6, considerou-se um $\lambda = 0,02$, que foi obtido através da média do valor de λ obtida para cada um dos 166 eventos.

Os métodos que determinaram CN através desta metodologia foram: M3, M4 e M5, sendo obtidos com base na média, moda e mediana, respectivamente.

3.5.3 Determinação de CN considerando $\lambda = 0,2$, Q e P₅

Esta metodologia é semelhante à situação da metodologia descrita anteriormente, contudo, considerando $I_a = 0,2S$. Assim, tem-se:

$$S = \frac{(P-0,2S)^2 - Q(P-0,2S)}{Q} \quad (19)$$

É visto que a Equação 19 não tem solução algébrica direta, uma vez que o valor de S, separado no primeiro termo, depende dele mesmo no segundo termo da equação, fazendo-se necessário o emprego de resoluções através de métodos numéricos.

Sendo assim, Hawkins (1993) propôs a seguinte equação para o cálculo de S:

$$S = 5 \left[(P + 2Q) - \sqrt{4Q^2 + 5PQ} \right] \quad (20)$$

É importante observar que esta equação foi elaborada considerando um valor de $\lambda = 0,2$, ou seja, para outros valores de abstração inicial, ela não válida.

Os valores de S obtidos podem ser transformados em CN calculado utilizando-se a mesma Equação 18 descrita no método acima, ou ainda ser

diretamente calculado com base nos eventos de chuva-deflúvio observados, através da equação 21:

$$CN = \frac{25400}{254+5[(P+2Q)-\sqrt{4Q^2+5PQ}]} \quad (21)$$

Assim como na metodologia anterior, um valor de CN para cada evento foi estimado, e para a determinação de um CN que seja representativo da BHRJ, fez-se os mesmos cálculos da moda, média e mediana para as três condições de umidade antecedente, CN_I, CN_{II} e CN_{III}.

Na estimativa do escoamento superficial direto (Q), a equação 6 é aplicada em sua forma original, ou seja, com $\lambda = 0,2$.

Os métodos denominados M6, M7 e M8 foram aqueles que determinaram CN através desta metodologia.

3.5.4 Determinação de CN considerando $\lambda = 0,02$, Q e P₅

Neste método, o valor de λ a ser considerado nos cálculos será a média da relação entre a abstração inicial e o armazenamento potencial de água no solo obtida a partir dos 166 eventos, que para a BHRJ foi de 0,02.

Neste caso, a equação 17 pode ser reescrita da seguinte forma:

$$S = \frac{(P-0,02S)^2 - Q(P-0,02S)}{Q} \quad (22)$$

Da mesma forma, quando se considerou um $I_a = 0,2 S$, verifica-se que esta equação também não tem solução direta, além disto, a equação elaborada por Hawkins (1993) não pode ser aplicada, uma vez que foi elaborada para se considerar um $\lambda = 0,2$.

Ainda assim, Chen (1982) elaborou uma equação que calcula S considerando qualquer valor de λ :

$$S = \frac{P}{\lambda} + \frac{(1-\lambda)Q - \sqrt{(1-\lambda)^2 Q^2 + 4\lambda P Q}}{2\lambda^2} \quad (23)$$

A Equação 20, formulada por Hawkins (1993), é apenas uma particularidade da Equação 23, quando se considera $\lambda = 0,2$.

Combinando a Equação 18 com a equação 23, o valor de CN pode ser obtido diretamente através dos valores de P e Q observados, ou seja:

$$CN = \frac{25400}{\frac{P}{\lambda} + \frac{(1-\lambda)Q - \sqrt{(1-\lambda)^2 Q^2 + 4\lambda P Q}}{2\lambda^2} + 254} \quad (24)$$

Esta equação é bastante útil, uma vez que permite calcular o valor de CN para um evento chuva-deflúvio qualquer, considerando diferentes valores de λ .

Calculados os valores de CN para cada evento chuva-deflúvio, a metodologia aplicada anteriormente foi novamente utilizada, onde foram obtidos nove valores de CN, pois, além de se considerar a média entre os eventos, considerou-se também a moda e a mediana para todas as três classes: CN_I, CN_{II} e CN_{III}.

A média, moda e mediana dos valores de CN calculados foram utilizadas para a estimativa do escoamento superficial direto (Q) sendo apresentadas nos resultados como M9, M10, e M11, respectivamente.

3.5.5 Determinação de CN considerando $\lambda = 0,05$, Q e P_5

Para a determinação do CN considerando $\lambda = 0,05$ através de eventos chuva-deflúvio observados, utilizam-se as mesmas equações apresentadas no item anterior. Esse valor foi proposto por Woodward et al. (2003) que conduziram seus estudos em 307 bacias hidrográficas, e verificaram que em 252 delas o resultado se aproximou melhor do que quando se considera $\lambda = 0,2$. Shi et al. (2009) também encontraram melhores estimativas, considerando $\lambda = 0,05$.

Após a determinação dos valores de CN, e através da média, moda e mediana destes, calcula-se o escoamento superficial direto (Q) pela aplicação da equação 14.

Para a apresentação dos resultados, essa metodologia foi denominada de M12, M13 e M14 para o valor da média, moda e mediana, respectivamente.

3.5.6 Determinação dos valores de CN pelo método *Asymptotic Determination of runoff Curve Numbers* (HAWKINS, 1993)

Os valores de CN podem ainda ser determinados através de eventos chuva-deflúvio observados, porém, com o escoamento superficial direto (Q) e com a precipitação (P), classificados em ordem decrescente e de forma independente (classifica-se o escoamento independente de qual precipitação esteja vinculado), considerando sempre o mesmo período de retorno dos dados (HAWKINS, 1993).

Hawkins (1993), em seu estudo sobre a determinação assintótica de um valor de CN representativo para uma bacia, analisou um número significativo de bacias hidrográficas com os valores de CN calculados a partir de dados chuva-deflúvio observados, e concluiu que quase sempre surgem duas correlações entre o valor CN calculado e a precipitação. Na maioria das bacias hidrográficas, os valores de CN calculados tendem a se aproximar de um valor constante à

medida que a precipitação aumenta significativamente, sendo este valor, aquele que irá caracterizar a bacia para eventos extremos.

Os três comportamentos diferentes que foram observados são descritos a seguir: o cenário mais comum é onde menores precipitações correspondem a maiores valores de CN calculados que, progressivamente tendem a diminuir à medida que a quantidade de chuva aumenta, aproximando-se de um valor de CN quase constante à medida que eventos de chuva se tornam de grande magnitude (HAWKINS, 1993). Este comportamento é o mais frequentemente observado e é caracterizado como padrão (*standard behaviour*). Um exemplo deste pode ser visto na Figura 9.

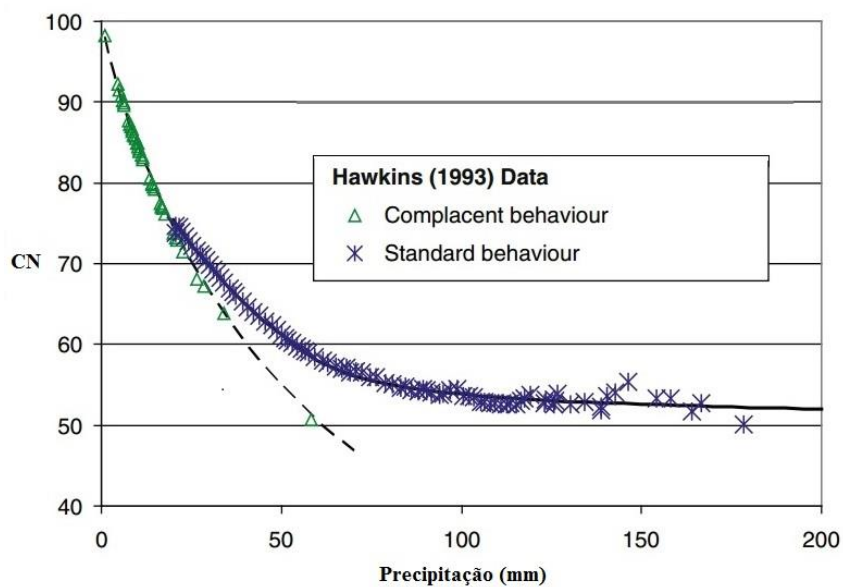


Figura 9 Representação da determinação assintótica do parâmetro CN apresentada por Hawkins (1993) através de dois comportamentos distintos: *Complacent behaviour* e *standard behaviour*

Fonte: Adaptada de Soulis e Valiantzas, (2013)

Para bacias hidrográficas que apresentam este comportamento e para eventos extremos de precipitação, Hawkins (1993) sugere a aplicação de um único valor de CN, após este valor tornar-se praticamente constante.

Um caso menos observado em bacias ocorre quando os valores de CN diminuem continuamente com o aumento da precipitação, sem uma tendência observável de se atingir um valor constante (SOULIS; VALIANTZAS, 2013). Esse comportamento foi caracterizado como complacente (*complacent behaviour*), que também está representado na Figura 9.

Em um último caso, que corresponde a um número mínimo de bacias hidrográficas, o CN calculado aparentemente tem um valor constante para todos os eventos de precipitação, exceto aqueles de pequena magnitude, onde os valores de CN aumentam bruscamente (SOULIS; VALIANTZAS, 2012).

Exemplos de trabalhos realizados em bacias hidrográficas que apresentam os comportamentos acima especificados, podem ser encontrados em Bonta (1997) e Hjelmfeld et al. (2001).

Um problema na aplicação desta metodologia é que o valor assintótico de CN, e que é usado para representar toda a bacia, leva em consideração apenas os maiores eventos de precipitação, ou seja, sua representatividade pode ser questionável quando se considera eventos com precipitações mais baixas (ENDALE et al., 2015). Conseqüentemente, o resultado do escoamento superficial direto calculado para eventos de baixa ou média precipitação não são confiáveis, limitando assim, sua aplicabilidade para o cálculo de vazões máximas.

Hawkins et al. (1993), Endale et al. (2013) e Soulis e Valiantzas (2012, 2013), consideraram apenas os eventos de precipitação maiores do que 26 mm, e para este estudo, eventos maiores do que 10 mm foram separados com o propósito de calcular o escoamento superficial direto para qualquer evento de precipitação.

Outra consideração a ser feita, é que este método foi elaborado para determinar um valor de CN que se aproxima de uma constante, então, para as bacias hidrográficas nas quais se observa o (*complacent behaviour*), mesmo para os maiores eventos, este valor não se aproximará de uma constante, logo, este método não é o mais indicado (HAWKINS, 1993).

O primeiro passo para aplicar esta metodologia é separar P e Q e classificá-los em ordem decrescente individualmente, conforme dito anteriormente. Após isso, calcula-se os valores de CN para os pares de P e Q formados, utilizando a Equação 24 de forma direta, para qualquer valor de λ considerado. Para o caso da BHRJ foram feitas 3 considerações: $\lambda = 0,2$, conforme proposta inicial do método CN-SCS; $\lambda = 0,05$, e $\lambda = 0,02$, que foi a média observada da abstração inicial para a bacia.

O terceiro passo é classificar o comportamento que a bacia apresenta conforme Hawkins et al. (1993) em: *standard behaviour* ou *violent behaviour*. Para *complacent behaviour*, conforme dito anteriormente, este método não é indicado, uma vez que o valor de CN não se aproxima de um valor constante com o aumento da precipitação, e por isso, não existe uma equação que descreva tal situação.

Observa-se que, nos casos expostos acima, o valor de CN varia com a precipitação, logo, as seguintes equações foram elaboradas por Hawkins (1993) para ajustar o valor de CN em função de P, considerando *standard behaviour* e *violent behaviour*, respectivamente:

$$CN(P) = CN_{\infty} + (100 - CN_{\infty})\exp(-\mu_1 P) \quad (25)$$

$$CN(P) = CN_{\infty}[1 - \exp(-\mu_2 P)] \quad (26)$$

sendo CN_{∞} = valor constante de CN aproximado quando P tende ao infinito, P é a precipitação, e μ_1 e μ_2 são valores de coeficientes ajustados pelo método das diferenças dos quadrados mínimos.

Como os valores de CN são classificados de forma independente, é visto que apesar das equações acima ajustarem-se muito bem aos dados ordenados, os valores de CN determinados para a estimativa de Q em eventos de precipitações mais baixos é questionável, após estes serem aplicados aos dados não ordenados.

Para a BHRJ, apenas a equação 25 foi ajustada, uma vez que apenas o comportamento padrão *standard behaviour* foi observado.

Para avaliar se o método proposto por Hawkins (1993) realmente é mais eficiente para a estimativa de Q considerando apenas os eventos de precipitação mais extremos, ou seja, aqueles que realmente interessam para o dimensionamento de obras hidráulicas (BONTA, 2015), a estimativa de Q foi feita com a aplicação da equação 25 e da equação 6 para os 166 eventos chuva-deflúvio observados (não ordenados), e depois apenas para os eventos maiores do que 60 mm, os quais totalizaram 32, sendo os métodos M18, M19 e M20 aplicados para esta finalidade.

A vantagem desta metodologia é que ela não atribui um único valor de CN para toda a bacia, pois, este valor a ser considerado na estimativa de Q é função da precipitação que o originou. Todavia, este método não considera a umidade antecedente, uma vez que seu ajuste é feito após o ordenamento dos dados de Q e P de forma independente.

3.5.7 Determinação do CN através da aproximação com um sistema de dois valores de CN *The Two-CN system approach* (SOULIS; VALIANTZAS, 2012)

A metodologia descrita anteriormente por Hawkins (1993), e também estudada por Hjelmfelt (2001), tem como objetivo o cálculo de um valor

assintótico de CN para os maiores eventos de precipitação ($> 26\text{mm}$). Por causa disso, a aplicabilidade deste método para eventos menores é questionável. Além disso, para bacias que apresentam um comportamento complacente, *complacent behaviour*, a metodologia descrita para o cálculo de CN também não é recomendada (SOULIS; VALIANTZAS, 2012). Devido a estas limitações, Soulis e Valiantzas (2012) investigaram uma nova hipótese de que a correlação existente entre o CN calculado e a precipitação em uma bacia hidrográfica, reflete o efeito da inevitável variabilidade espacial do uso e classes de solo na bacia, ou seja, a variabilidade dos processos hidrológicos existentes. Eles mostraram que a variabilidade espacial do uso e classes do solo produz uma diminuição de forma progressiva nos valores de CN calculados à medida que a precipitação diminui, e para os maiores eventos de precipitação, o valor de CN tende a se estabilizar em um valor assintótico composto *composite CN value*.

Baseado nesta hipótese, Soulis e Valiantzas (2012) introduziram o conceito de *two CN model system approach* que modela a variação dos valores de CN calculados para cada evento de chuva observado, reduzindo a variabilidade espacial do CN na bacia hidrográfica em apenas duas classes.

Na Figura 10, a aproximação do sistema com dois valores de CN (*two CN model*), proposto por Soulis e Valiantzas (2012), foi ajustada para os dados apresentados por Hawkins (1993) para o comportamento padrão *standard behaviour* e para o comportamento complacente (*complacete behaviour*).

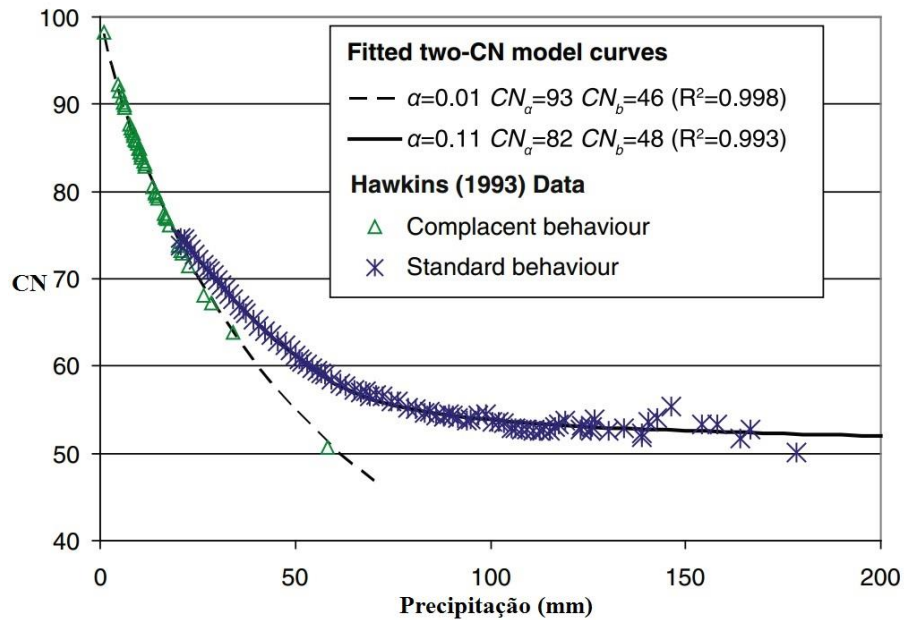


Figura 10 Representação do ajuste do método *two CN system approach* com o método de determinação assintótica do parâmetro CN apresentado por Hawkins (1993) para dois comportamentos distintos: *Complacent behaviour* e *standard behaviour*

Fonte: Adaptada de Soulis e Valiantzas (2012)

Para a aplicação deste método são necessários dados de chuva-deflúvio observados, além da aplicação de técnicas de sensoriamento remoto e de geoprocessamento para fornecer informações das características espaciais da bacia hidrográfica.

Os procedimentos para a determinação do CN através da aproximação com um sistema de dois CN's são os seguintes:

- Os valores de precipitação (P) e de escoamento superficial direto (Q) observados são classificados em ordem decrescente, de forma independente, conforme metodologia proposta por Hawkins (1993) e Hjmfelt (2001). Após essa ordenação, calcula-se os valores de CN para cada par P-Q formado através da aplicação direta da equação 24 para qualquer valor de λ . No caso da BHRJ, foram aplicados o valor original

proposto com $\lambda = 0,2$, assim como o valor proposto por Woodward et al. (2003), com $\lambda = 0,05$, e também, o valor encontrado para a bacia pela separação da abstração inicial, $\lambda = 0,02$. Até aqui, o processo é o mesmo que o da metodologia anterior;

- ii. Na sequência, a bacia é separada em duas áreas, atribuindo-se um valor de CN inicial para cada uma delas, sendo chamados de CN_a^0 e CN_b^0 , com $CN_a^0 > CN_b^0$. Se a área da bacia que apresenta um valor de CN = CN_a^0 é igual a “a”, então (1-a) é a área da bacia em que $CN = CN_b^0$. Essa atribuição pode ser feita com base no mapa de CN obtido pela aplicação direta da tabela, e aplicação da equação 13. Ou então, como no caso da BHRJ, com a utilização do programa ArcGIS faz-se uma separação dos valores de CN em duas classes, e, observando o histograma de frequência um valor inicial de CN_a^0 e CN_b^0 é atribuído; este consiste de um valor inicial para o ajuste do modelo;
- iii. Com a aplicação da equação 8, calcula-se um valor de armazenamento potencial de água no solo (S) para cada CN atribuído, CN_a^0 e CN_b^0 , e por sua vez, calcula-se a parcela da abstração inicial (λS) para cada um dos valores de λ considerado;
- iv. Após isso, aplicam-se as equações 28, 29, 30, 31 e 32 para a obtenção do valor do escoamento superficial direto (Q) calculado, que, através da equação 27, encontra-se o valor de CN calculado para cada evento com $\lambda = 0,2$. Para outro λ considerado, aplica-se a equação 24, contudo, Q deve ser substituído por Q_a+Q_b ;
- v. Finalmente, através do ajuste feito pelo método dos mínimos quadrados, os parâmetros, a, CN_a e CN_b são ajustados para cada valor de λ considerado.

$$CN = \frac{25400}{5(P+2(Qa+Qb)-\sqrt{4(Qa+Qb)^2+5P(Qa+Qb)})+254} \quad (27)$$

Em que:

$$Qa = a \frac{\left(P - \lambda \left(\frac{25400}{CNa} - 254\right)\right)^2}{P + (1-\lambda)\left(\frac{25400}{CNa} - 254\right)} \quad (28)$$

$$Qb = (1-a) \frac{\left(P - \lambda \left(\frac{25400}{CNb} - 254\right)\right)^2}{P + (1-\lambda)\left(\frac{25400}{CNb} - 254\right)} \quad (29)$$

Sendo,

$$Q = Qa \text{ se } \lambda \left(\frac{25400}{CNa} - 254\right) \leq P \leq \lambda \left(\frac{25400}{CNb} - 254\right) \quad (30)$$

$$Q = Qa + Qb \text{ se } P \geq \lambda \left(\frac{25400}{CNb} - 254\right) \quad (31)$$

$$Q = 0 \text{ se } P \leq \lambda \left(\frac{25400}{CNa} - 254\right) \quad (32)$$

Os métodos M21, M22 e M23, se embasaram nestes procedimentos descritos, para $\lambda = 0,2, 0,05$ e $0,02$, respectivamente. Os métodos M24, M25 e M26 seguiram o mesmo padrão, porém, foram aplicados para os eventos maiores que 60 mm.

A ideia de se dividir a bacia em duas áreas homogêneas originou da seguinte hipótese: durante um evento de chuva qualquer, o escoamento superficial direto é formado inicialmente nas áreas com menores capacidades de

infiltração, então, à medida que a precipitação continua a ocorrer, o escoamento também é formado em áreas com maior capacidade de infiltração. O escoamento superficial direto máximo observado, ocorre quando todas as áreas contribuem para o mesmo (WALEGA et al., 2015).

Contudo, na maioria das vezes mais do que dois valores de CN são encontrados em bacias hidrográficas. Devido a isso, para melhor descrever as reais condições da bacia, seria preferível se o número de CN considerado fosse o mesmo obtido pelo mapeamento, ou seja, o mesmo número de combinações existente entre a classificação dos tipos de solo dentro dos grupos hidrológicos com os usos do solo considerados. Entretanto, a cada valor de CN atribuído requer-se a determinação de outros dois parâmetros (o valor de CN, e a área que cada um está associado), ocasionando problemas de não convergência, ou ainda, soluções infinitas quando a solução inversa é aplicada.

Desta forma, a metodologia proposta por Soulis e Valiantzas (2013) amplia o número de categorias de CN identificados para o número real de combinações existentes entre o uso e a classe de solo presentes na bacia, passando a ser chamada de ‘Modelo Heterogêneo’.

Assumindo que o escoamento superficial direto Q observado na seção controle da bacia é a soma parcial de Q_i ($i=1$ até n), ou seja, de cada área associada a um valor de CN_i , e “ a_i ” é a porcentagem de cada área associada, a equação 24 pode ser reescrita da seguinte forma:

$$CN = \frac{25400}{\frac{P}{\lambda} + \frac{(1-\lambda)\sum Q_i - \sqrt{(1-\lambda)^2(\sum Q_i)^2 + 4\lambda P \sum Q_i}}{2\lambda^2} + 254} \quad (33)$$

Em que,

$$Qi = 0 \text{ se } P < \lambda \left(\frac{25400}{CNi} - 254 \right) \quad (34)$$

$$Qi = \frac{ai \left(P - \lambda \left(\frac{25400}{CNi} - 254 \right) \right)^2}{100 P + (1 - \lambda) \left(\frac{25400}{CNi} - 254 \right)} \text{ se } P \geq \lambda \left(\frac{25400}{CNi} - 254 \right) \quad (35)$$

$$\sum_{i=1}^n ai = 100 \quad (36)$$

Para o cálculo dos valores de CNi, os seguintes procedimentos são aplicados:

- i. Os valores de P e Q são ordenados conforme descrito anteriormente;
- ii. Com os novos pares de P e Q formados, calcula-se o valor de CN para cada evento pela aplicação da equação 24, formando-se pares de P-CN;
- iii. O mapa de CN obtido pela primeira metodologia descrita é utilizado, onde foram encontrados 11 valores de CN dentre os 12 possíveis. Com isso, calcula-se a área que cada valor de CN está vinculado; essas áreas serão as mesmas áreas atribuídas a cada CN a ser calculado;
- iv. Antes do ajuste das equações, algumas considerações são necessárias, tais como, para a BHRJ, onde fixou-se o valor de CN para os locais classificados como área urbana;
- v. A equação 33 é então ajustada com no método dos mínimos quadrados, aplicando também as equações 34, 35 e 36;
- vi. E por último, os valores de CN calculados são inseridos no mapa, melhorando a visualização da variabilidade espacial deste.

Os métodos M27, M28 e M29 foram os que determinaram CN seguindo esta metodologia, tendo como resultado final, 3 mapas de CN para a BHRJ, um para cada valor de λ considerado.

3.6 Estatísticas de precisão

Para avaliar quais dos métodos de determinação do CN produziram melhores resultados, três critérios de avaliação foram utilizados, baseando-se nos valores estimados e observados do escoamento superficial direto.

3.6.1 Raiz do quadrado médio do erro (RMSE)

O RMSE, aplicado para a avaliação do ajuste de dados de escoamento superficial direto calculado pelo método CN-SCS, vem sendo aplicado a vários trabalhos (MISHRA et al. 2006; JAIN et al., 2006b; SAHU et al., 2010; DESHMUKH et al., 2013; AJMAL et al. 2015), e é expresso pela seguinte equação:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Q_0 - Q_c)_i^2} \quad (37)$$

Sendo n o número de eventos chuva-deflúvio utilizados, e i é um número inteiro variando de 1 até n . Quanto mais o RMSE se aproximar de zero, melhor é o ajuste do modelo (RMSE = 0 indica um ajuste perfeito dos dados).

3.6.2 Coeficiente de Eficiência de Nash-Sutcliffe (C_{NS})

O C_{NS} (NASH; SUTCLIFFE, 1970) é considerado a principal estatística de precisão aplicada a modelos hidrológicos, sendo padrão neste tipo de estudo (DESHMUKH et al., 2013; KINGEBALOGH, 2008; SAHU et al., 2010; YUAN et al., 2014; AJMAL et al., 2015), e é definido como:

$$C_{NS} = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_0 - Q_c)_i^2}{\sum_{i=1}^n (Q_0 - \overline{Q_0})_i^2} \right] \quad (38)$$

Em que:

$\overline{Q_0}$ representa a média do escoamento superficial direto observado (mm);

Q_0 representa o escoamento superficial direto observado para o evento i (mm);

Q_c representa o escoamento superficial direto estimado para o evento i (mm)

O valor de C_{NS} varia de $-\infty$ até 1, onde este último representa o ajuste perfeito dos dados (Alfieri et al. 2014; Ajmal et al. 2015).

Moriasi et al. (2007) sugerem a seguinte classificação para esse coeficiente: $C_{NS} \geq 0,65$, muito bom; $0,54 \leq C_{NS} < 0,65$, bom; $0,50 \leq C_{NS} < 0,54$, satisfatório. Valores de C_{NS} inferiores a 0,50, foram considerados como ajustes insatisfatórios.

3.6.3 Coeficiente P_{bias}

O P_{bias} mede a tendência dos dados calculados serem menores ou maiores do que os dados observados, e é expresso como:

$$P_{bias} = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Q_0 - Q_c)_i}{\sum_{i=1}^n (Q_0)_i} \right] \times 100 \quad (39)$$

O valor ideal de P_{bias} é igual a zero. Valores próximos a zero indicam um modelo sem tendência na estimativa dos dados, sendo que os valores negativos indicam que o modelo superestima os dados estimados em relação aos observados e positivo, subestima.

Um modelo com valores de $P_{\text{b\u00edas}}$ variando no intervalo de $\pm 25\%$ demonstra resultados satisfat\u00f3rios; entre $\pm 15\%$ \u00e9 caracterizado com bom; e variando entre $\pm 10\%$ indica um desempenho muito bom do modelo na representa\u00e7\u00e3o dos dados (MORIASI et al., 2007; YUAN et al., 2014; AJMAL et al., 2015a).

4 RESULTADOS

4.1 Apresentação dos dados observados aplicados a este estudo

Os dados apresentados na Tabela 5 foram aqueles obtidos através do monitoramento e separação dos 166 eventos estudados, sendo, portanto, a base para a aplicação dos modelos estatísticos usados na avaliação da estimativa de Q pela aplicação dos diferentes métodos de determinação do CN.

Os valores de S, CN e λ apresentados são os valores reais de cada evento, onde S foi calculado pela equação 17, λ é a relação entre a abstração inicial separada e o respectivo S calculado, e CN pela equação 18.

Tabela 5 Dados observados de 2006 a 2016 para a BHRJ (continua...)

Data	Q_{obs}	P_{total}	P₅	AMC	Ia	S	λ	CN do evento
Dia/mês/ano	mm	mm	mm		mm	mm		
02/02/2006	0,433	12	38	2	0	320,8	0,00	44,2
12/02/2006	4,317	40	44	2	0	330,6	0,00	43,4
15/02/2006	7,750	28	79	3	0	73,2	0,00	77,6
28/02/2006	0,831	21	15	1	10	134,6	0,07	65,4
02/03/2006	0,197	13	37	2	6	242,3	0,02	51,2
06/03/2006	1,211	26	51	2	4	377,5	0,01	40,2
10/03/2006	2,571	34	29	1	12	166,2	0,07	60,4
07/10/2006	0,483	31	27	1	4	1482,5	0,00	14,6
19/10/2006	1,695	61	14	1	16	1149,8	0,01	18,1
19/11/2006	0,387	30	0	1	5	1589,7	0,00	13,8
29/11/2006	1,089	28	23	1	0	691,7	0,00	26,9
10/12/2006	1,757	31	46	2	1	482,4	0,00	34,5
15/12/2006	4,585	38	91	3	4	218,2	0,02	53,8
02/01/2007	1,754	23	61	3	6	147,8	0,04	63,2
09/01/2007	0,637	18	31	1	9	118,2	0,08	68,2
14/01/2007	32,71	144	45	2	0	490,0	0,00	34,1
15/01/2007	7,960	47	102	3	4	189,3	0,02	57,3

Data	Q_{obs}	P_{total}	P₅	AMC	Ia	S	λ	CN do evento
Dia/mês/ano	mm	mm	mm		mm	mm		
26/01/2007	14,310	68	117	3	0	255,1	0,00	49,9
29/01/2007	1,806	15	111	3	1	94,5	0,01	72,9
30/01/2007	6,051	34	125	3	3	127,8	0,02	66,5
06/02/2007	2,040	27	4	1	0	330,4	0,00	43,5
19/11/2007	0,478	32	0	1	2	1853,3	0,00	12,1
14/12/2007	0,794	35	31	1	11	701,9	0,02	26,6
19/12/2007	1,264	51	39	2	4	1700,4	0,00	13,0
07/01/2008	6,156	49	40	2	14	164,0	0,09	60,8
21/01/2008	2,053	50	42	2	4	984,9	0,00	20,5
13/02/2008	3,990	51	2	1	0	600,8	0,00	29,7
01/03/2008	3,280	46	15	1	2	546,2	0,00	31,7
12/03/2008	1,726	29	39	2	8	234,5	0,03	52,0
13/03/2008	1,008	15	59	3	0	208,2	0,00	55,0
14/03/2008	6,203	60	74	3	1	502,2	0,00	33,6
15/03/2008	18,232	67	108	3	3	160,7	0,02	61,3
08/04/2008	1,156	25	57	3	0	515,5	0,00	33,0
14/04/2008	1,807	33	7	1	0	569,8	0,00	30,8
02/10/2008	1,613	56	0	1	0	1888,6	0,00	11,9
03/10/2008	0,585	15	56	3	2	276,1	0,01	47,9
13/11/2008	3,126	59	32	1	0	1054,6	0,00	19,4
17/11/2008	2,128	28	77	3	6	205,5	0,03	55,3
27/11/2008	1,320	29	9	1	1	565,7	0,00	31,0
15/12/2008	23,009	141	57	3	0	723,1	0,00	26,0
26/12/2008	11,171	81	18	1	2	479,7	0,00	34,6
02/01/2009	0,770	25	34	1	0	786,4	0,00	24,4
03/01/2009	0,740	15	59	3	0	288,9	0,00	46,8
04/01/2009	6,667	49	58	3	0	311,1	0,00	44,9
20/01/2009	16,909	102	41	2	6	449,0	0,01	36,1
27/01/2009	0,994	14	19	1	1	157,1	0,01	61,8
28/01/2009	5,323	38	33	1	0	233,3	0,00	52,1
31/01/2009	5,804	23	80	3	0	68,1	0,00	78,8
02/02/2009	1,573	20	70	3	2	187,9	0,01	57,5

Data	Q_{obs}	P_{total}	P₅	AMC	Ia	S	λ	CN do evento
Dia/mês/ano	mm	mm	mm		mm	mm		
10/02/2009	3,337	16	18	1	1	52,4	0,02	82,9
12/02/2009	6,049	50	33	1	7	262,7	0,03	49,2
13/02/2009	6,912	45	89	3	10	142,2	0,07	64,1
27/03/2009	45,000	204	28	1	8	657,7	0,01	27,9
30/03/2009	10,991	49	204	3	3	146,5	0,02	63,4
06/04/2009	5,692	39	1	1	2	203,5	0,01	55,5
06/09/2009	0,313	27	6	1	0	2299,4	0,00	9,9
21/09/2009	0,765	69	0	1	11	4339,9	0,00	5,5
07/06/2011	0,522	23	0	1	0	990,3	0,00	20,4
09/06/2011	0,600	27	23	2	0	1187,4	0,00	17,6
11/10/2011	0,949	21	17	1	0	443,6	0,00	36,4
15/10/2011	1,738	41	33	1	4	750,5	0,01	25,3
01/12/2011	0,953	42	52	2	18	580,2	0,03	30,4
05/12/2011	1,176	41	48	2	0	1388,4	0,00	15,5
06/12/2011	13,815	59	83	3	0	193,0	0,00	56,8
08/12/2011	16,265	101	113	3	37	187,8	0,20	57,5
12/12/2011	1,301	35	216	3	2	804,0	0,00	24,0
18/12/2011	0,805	21	53	2	9	166,9	0,05	60,4
25/12/2011	0,518	37	0	1	9	1486,2	0,01	14,6
26/12/2011	3,351	58	40	2	3	847,6	0,00	23,1
28/12/2011	16,514	99	111	3	17	325,2	0,05	43,9
01/01/2012	48,047	153	147	3	4	313,1	0,01	44,8
03/01/2012	16,973	58	298	3	13	74,3	0,17	77,4
06/01/2012	7,317	36	172	3	0	141,1	0,00	64,3
08/01/2012	64,318	158	94	3	0	230,1	0,00	52,5
16/01/2012	4,991	41	15	1	8	185,2	0,04	57,8
19/01/2012	25,740	40	70	3	0	22,2	0,00	92,0
25/01/2012	0,565	24	13	1	0	995,8	0,00	20,3
29/01/2012	15,658	49	77	3	1	99,1	0,01	71,9
11/02/2012	1,454	26	0	1	1	404,9	0,00	38,5
13/02/2012	1,309	25	43	2	4	315,8	0,01	44,6
22/02/2012	2,919	61	0	1	0	1213,9	0,00	17,3

Data	Q_{obs}	P_{total}	P₅	AMC	Ia	S	λ	CN do evento
Dia/mês/ano	mm	mm	mm		mm	mm		
09/03/2012	0,453	48	0	1	14	2518,3	0,01	9,2
11/03/2012	0,578	24	48	2	0	971,7	0,00	20,7
16/03/2012	1,116	32	45	2	6	579,6	0,01	30,5
31/03/2012	0,377	22	9	1	3	937,5	0,00	21,3
14/05/2012	0,764	36	0	1	9	927,4	0,01	21,5
25/05/2012	0,431	25	0	1	0	1425,3	0,00	15,1
06/06/2012	0,745	36	9	1	12	749,5	0,02	25,3
12/10/2012	0,812	50	4	1	6	2339,3	0,00	9,8
13/11/2012	0,354	23	48	2	0	1471,7	0,00	14,7
15/11/2012	1,014	30	42	2	6	544,0	0,01	31,8
20/11/2012	0,478	24	30	1	7	587,7	0,01	30,2
24/11/2012	2,193	66	25	1	2	1803,6	0,00	12,3
02/12/2012	3,547	43	2	1	0	478,3	0,00	34,7
10/12/2012	5,920	38	1	1	0	205,9	0,00	55,2
17/12/2012	0,708	11	64	3	5	44,9	0,11	85,0
21/12/2012	0,260	15	20	1	2	637,8	0,00	28,5
28/12/2012	7,939	78	0	1	0	688,3	0,00	27,0
02/01/2013	0,297	37	78	3	1	4324,6	0,00	5,5
03/01/2013	3,611	35	37	2	15	90,8	0,17	73,7
04/01/2013	0,477	20	72	3	6	396,5	0,02	39,0
08/01/2013	9,424	70	39	2	4	396,2	0,01	39,1
10/01/2013	22,883	114	101	3	8	385,0	0,02	39,7
13/01/2013	5,244	36	226	3	5	152,3	0,03	62,5
15/01/2013	7,149	48	182	3	5	215,7	0,02	54,1
25/01/2013	2,181	48	4	1	16	437,5	0,04	36,7
27/01/2013	3,998	37	48	2	6	209,4	0,03	54,8
29/01/2013	3,239	42	87	3	0	502,7	0,00	33,6
31/01/2013	1,480	11	128	3	1	57,6	0,02	81,5
01/02/2013	8,816	65	57	3	10	288,1	0,03	46,9
05/02/2013	5,473	28	92	3	13	26,1	0,50	90,7
22/02/2013	2,469	51	0	1	1	962,6	0,00	20,9
01/03/2013	2,190	57	2	1	9	1004,0	0,01	20,2

Data	Q_{obs}	P_{total}	P₅	AMC	Ia	S	λ	CN do evento
Dia/mês/ano	mm	mm	mm		mm	mm		
07/03/2013	2,181	54	5	1	0	1283,2	0,00	16,5
09/03/2013	2,449	43	54	3	3	613,3	0,00	29,3
26/03/2013	2,776	56	3	1	17	509,0	0,03	33,3
27/03/2013	1,481	26	58	3	0	430,5	0,00	37,1
05/04/2013	0,552	23	6	1	7	447,8	0,02	36,2
08/04/2013	0,791	41	26	2	0	2085,5	0,00	10,9
27/05/2013	3,470	60	12	1	26	299,1	0,09	45,9
28/05/2013	1,070	35	68	3	0	1109,5	0,00	18,6
02/10/2013	0,519	37	34	1	0	2602,7	0,00	8,9
17/01/2014	1,218	70	4	1	0	3951,6	0,00	6,0
28/02/2014	1,063	51,6	0	1	10	1602,4	0,01	13,7
13/04/2014	0,418	29,8	6	1	0	2093,8	0,00	10,8
19/06/2014	0,240	13	0	1	0	690,0	0,00	26,9
17/08/2014	0,865	32	0	1	4	878,9	0,00	22,4
01/11/2014	0,680	79	6	1	15	5958,2	0,00	4,1
12/11/2014	0,691	36,6	11	1	8	1154,6	0,01	18,0
26/11/2014	1,394	49	42	2	5	1344,6	0,00	15,9
27/11/2014	1,080	33	95	3	0	975,4	0,00	20,7
28/11/2014	13,542	53	102	3	0	154,4	0,00	62,2
05/01/2015	0,817	32	22	1	9	624,5	0,01	28,9
22/01/2015	0,881	54	27	1	18	1435,9	0,01	15,0
01/02/2015	3,830	60	15	1	8	654,0	0,01	28,0
05/02/2015	1,347	38	74	3	1	979,3	0,00	20,6
09/02/2015	0,698	29	67	3	0	1176,5	0,00	17,8
11/02/2015	3,268	43	48	2	1	497,8	0,00	33,8
17/02/2015	2,808	44	13	1	0	645,5	0,00	28,2
27/02/2015	1,501	31,4	0	1	2	546,5	0,00	31,7
04/03/2015	0,272	30	31	1	1	3058,7	0,00	7,7
05/03/2015	2,815	14	22	1	0	55,6	0,00	82,0
08/03/2015	36,783	130	66	3	0	329,5	0,00	43,5
16/03/2015	22,499	83	19	1	0	223,2	0,00	53,2
22/03/2015	16,595	87	43	2	13	256,0	0,05	49,8

Data	Q_{obs}	P_{total}	P₅	AMC	Ia	S	λ	CN do evento
Dia/mês/ano	mm	mm	mm		mm	mm		
04/05/2015	1,345	48	1	1	18	638,9	0,03	28,4
10/05/2015	1,276	43	4	1	9	872,2	0,01	22,6
08/09/2015	0,880	60	33	3	9	2903,9	0,00	8,0
10/09/2015	3,105	68	101	3	2	1337,1	0,00	16,0
01/11/2015	1,337	66	23	1	0	3192,2	0,00	7,4
30/11/2015	1,238	21,4	14	1	5	200,8	0,02	55,8
01/12/2015	7,348	21	36	2	0	39,0	0,00	86,7
02/12/2015	6,594	44,6	57	3	3	220,8	0,01	53,5
17/12/2015	2,621	26,2	5	1	0	235,7	0,00	51,9
18/12/2015	4,080	28,2	29	1	0	166,7	0,00	60,4
20/12/2015	6,267	28,8	56	3	0	103,6	0,00	71,0
25/12/2015	5,262	29	32	1	2	107,9	0,02	70,2
03/01/2016	13,088	83	26	1	5	386,8	0,01	39,6
15/01/2016	13,512	94	65	3	42	148,1	0,28	63,2
27/01/2016	33,576	52	1	1	6	17,4	0,33	93,6
06/02/2016	0,728	24,2	0	1	0	780,1	0,00	24,6
11/02/2016	4,258	46,81	33	1	0	467,8	0,00	35,2
20/02/2016	1,344	50	2	1	0	1810,5	0,00	12,3
22/02/2016	1,608	30	57	3	6	334,2	0,02	43,2
04/03/2016	1,341	27	25	1	12	152,8	0,08	62,4
23/03/2016	0,780	22	2	1	1	544,5	0,00	31,8

(conclusão...)

Q_{obs} é o escoamento superficial direto observado, P_{total} é a precipitação total considerada durante o evento chuva-deflúvio, P₅ é a precipitação total ocorrida nos 5 dias antecedentes ao evento considerado, Ia é a abstração inicial obtida pelos hietogramas de cada evento, S é o armazenamento potencial de água no solo calculado através do Q_{obs} e Ia, λ é a relação obtida entre Ia e S, e CN é o valor de CN obtido com os dados observados para cada Ia separado.

O Gráfico 6 foi elaborado com o intuito de evidenciar a alta variabilidade dos valores de CN calculados para os eventos observados na BHRJ.

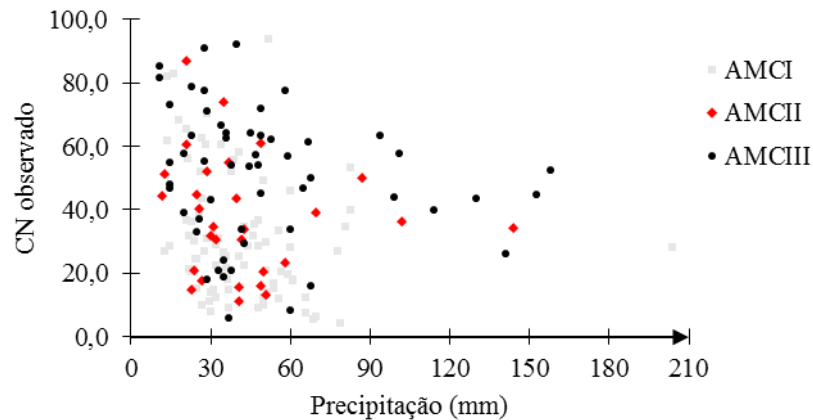


Gráfico 6 Variação dos valores de CN calculados para cada evento na BHRJ

É possível observar pelo Gráfico 6, que os valores de CN apresentados variam muito dentro de um mesmo intervalo de precipitação, principalmente para eventos menores que 80 mm.

Contudo, observa-se também que para os maiores eventos observados, existe uma convergência dos valores de CN para um valor aproximadamente constante, fato este também observado por Hawkins (1993), que deu origem ao seu trabalho de determinação assintótica do CN. Observa-se, com base no Gráfico 6, que para eventos maiores do que 80 mm, os valores de CN variaram de 26 a 63,2.

Essa oscilação dos valores de CN pode estar relacionada com vários fatores, tais como: intensidade e duração da chuva, condição de umidade antecedente, variação da abstração inicial ao longo do ano devido às mudanças que ocorrem na cobertura vegetal, e também alterações no uso do solo propriamente ditas.

Para a BHRJ onde o período de monitoramento foi equivalente a 10 anos, várias mudanças no uso do solo ocorreram, conforme pode ser observado

nos trabalhos realizados por Beskow (2009) e Melo Neto (2012), o que pode alterar de forma significativa os valores da abstração inicial.

Explorando ainda o Gráfico 6, é possível observar que mesmo considerando as condições de umidade antecedente para cada evento (83 eventos foram classificados como AMC I, 29 como AMC II, e 54 como AMC III), que foi feita com base na Tabela 1, a variação dos valores de CN observados continua significativa, mostrando, portanto, que mesmo separando-se os eventos de acordo com a precipitação ocorrida nos últimos 5 dias, a determinação de um valor de CN único para a bacia não é plausível.

A abstração inicial (Ia) caracterizada para cada evento também foi individualizada de acordo com as condições de umidade antecedente, com o propósito de verificar a influência da umidade do solo em seus valores. É notória a alta variação dos valores obtidos para qualquer AMC, conforme pode ser verificado através do Gráfico 7. É esperado que, para AMC I, os valores da abstração inicial sejam maiores do que para AMC II, e AMC III, respectivamente, uma vez que a condição I é aquela em que o solo se encontra seco, tendo, portanto, uma maior capacidade de infiltração do que para as condições II e III. Além do mais, pode existir ainda uma influência da topografia e da própria cobertura vegetal, onde, para AMC I as depleções no terreno e o dossel não estão saturados, fatos estes possíveis de serem observados para AMC III.

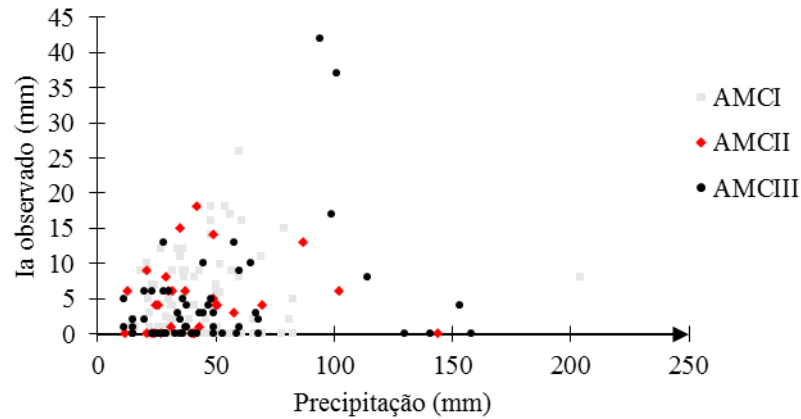


Gráfico 7 Variação dos valores de Ia separados para cada evento na BHRJ

Os valores de abstração inicial variaram de 0 a 42 mm, com uma média de 4,61 mm para todos os eventos, e médias de 4,70; 4,72; e 4,43 mm para as condições I, II e III de umidade antecedente, respectivamente.

A grande maioria dos eventos apresentou uma abstração inicial menor que 5 mm, ou seja, o escoamento superficial direto se inicia logo após o início da precipitação. Isso ocorre porque para separar o escoamento superficial direto do escoamento base, apenas eventos isolados foram escolhidos, pois estes dão origem a uma hidrógrafa de fácil identificação das inflexões A e C. Geralmente estes eventos de precipitação são de origem convectiva, os quais tendem a apresentar um padrão avançado.

Os valores de S também foram individualizados, conforme pode ser visto no Gráfico 8.

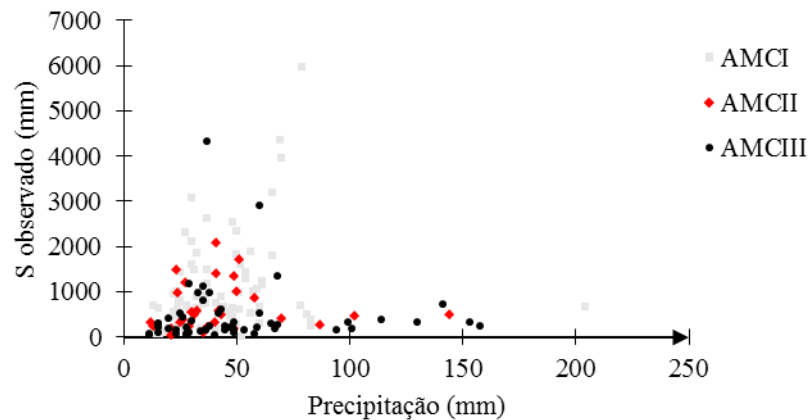


Gráfico 8 Variação dos valores de S para cada evento na BHRJ

Para as três condições de umidade antecedente, pode-se observar que no geral, S diminui de I para III, o que se explica pelo fato de que a condição de umidade III é aquela em que o solo já está saturado, portanto, seu armazenamento potencial de água é menor do que para a condição II e I. Assim, as médias para os valores encontrados foram de aproximadamente 1004, 642 e 452 mm para as condições I, II e III, respectivamente.

Contudo, observa-se também que alguns eventos extrapolaram a realidade física dos solos, como o caso observado na AMC III, em que um evento de precipitação equivalente a 37 mm produziu um S igual a 4324 mm. Este fato está relacionado ao baixo valor de Q observado e Ia observados, sendo iguais a 0,297 mm, e 1 mm, respectivamente. Desta forma, é admitido que toda precipitação ocorrida infiltrou-se no solo, gerando, portanto, um alto valor de S.

Alguns autores como Hawkins, (1991, 2001); Soulis e Valiantzas (2012), Ajmal et al. (2015) em seus estudos sobre métodos de determinação do CN, desconsideraram eventos de precipitação menores do que 25,4 mm, ou 1", e ainda, eventos em que o escoamento superficial direto observado fosse menor do

que 1 mm por diminuir significativamente o valor de CN calculado, devido ao alto valor de S.

Outros autores, além destas considerações, separaram os eventos de acordo com a vazão de pico observada na hidrógrafa. Soulis e Valiantzas (2013) desconsideraram, por exemplo, os eventos em que as vazões de pico fossem menores do que $0,250 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ para uma bacia de $15,2 \text{ km}^2$. Essas considerações, apesar de melhorar significativamente os resultados do trabalho, não foram consideradas para os estudos da BHRJ, onde o intuito é o de modelar o escoamento superficial direto para todos os eventos chuva-deflúvio com precipitações acima de 10 mm.

4.2 Relação chuva-deflúvio na BHRJ

Utilizando-se apenas dos dados de Q e P observados (Gráfico, 9), foi feito um ajuste através de um modelo polinomial de 2ª ordem, onde, através dos dados de precipitação foi possível estimar os valores de Q através da seguinte expressão:

$$Q = 0,0013P^2 + 0,0421P - 0,4503 \quad (40)$$

Em que, Q é o escoamento superficial direto a ser estimado (mm), e P é a precipitação total ocorrida no evento.

Apesar de ser um modelo simples, em que a única variável é a precipitação, esse modelo pode ser utilizado para preenchimento de falhas na bacia hidrográfica em questão, pois apresentou um R^2 de 0,74 e um C_{NS} igual a 0,74, que, de acordo com Moriasi et al. (2007) é considerado como sendo muito bom.

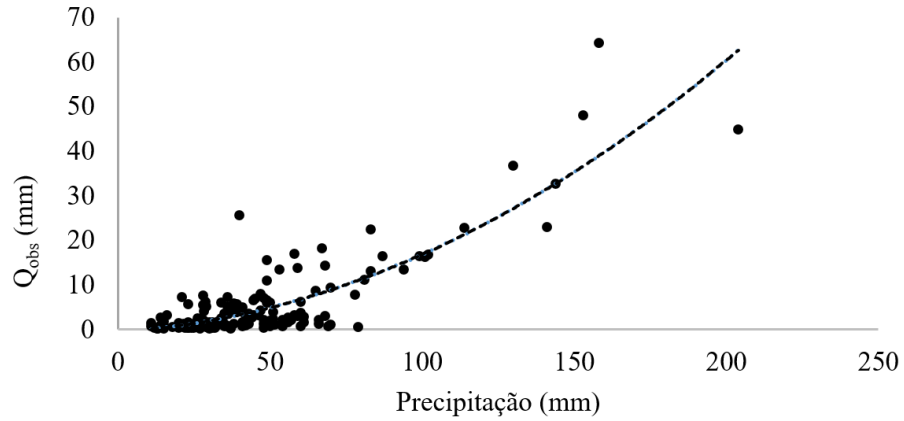


Gráfico 9 Ajuste do modelo simplificado chuva-deflúvio

Considerando ainda, a classificação dos eventos chuva-deflúvio em AMC I, II e III, foi possível melhorar os modelos para estimativa de Q (GRÁFICO 10):

$$Q = 0,0012P^2 - 0,0167P + 0,7974 \quad (41)$$

$$Q = 0,0017P^2 + 0,0212P + 0,6957 \quad (42)$$

$$Q = 0,0019P^2 + 0,0043P + 2,2628 \quad (43)$$

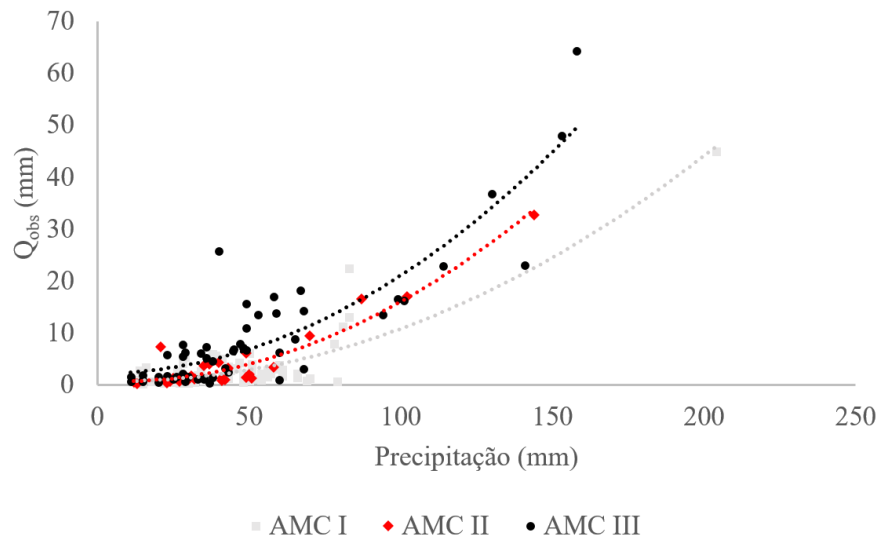


Gráfico 10 Ajuste do modelo simplificado chuva-deflúvio para cada AMC

Os valores de R^2 foram de 0,80, 0,92 e 0,79, para o ajuste das equações nas condições I, II e III, respectivamente. Trabalhando com as três equações para a estimativa do escoamento superficial direto, o R^2 que antes era de 0,74 aumenta para 0,83, e o coeficiente de Nash-Sutcliffe (C_{NS}) antes de 0,74, aumenta para 0,83, demonstrando que separar os eventos em AMC I, II e III aumenta a precisão dos modelos apresentados.

O Gráfico 11 mostra o ajuste dos dados de escoamento superficial direto calculados pelo ajuste simplificado, comparativamente aos dados observados. Para isso, o modelo simplificado aplicado foi aquele que considera a condição de umidade antecedente.

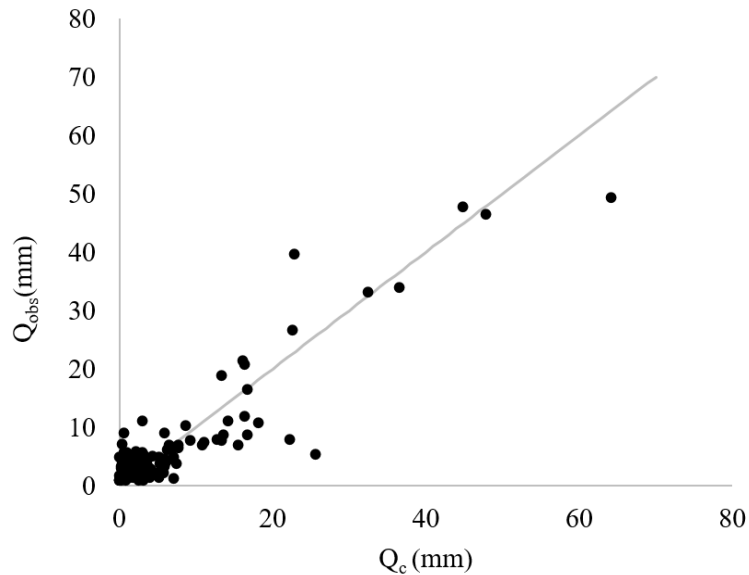


Gráfico 11 Ajuste dos dados de Q estimado comparativamente com os dados observados para o modelo simplificado chuva-deflúvio

É possível observar, que através de um modelo extremamente empírico, e muito simples, é possível estimar com certo grau de precisão o escoamento superficial direto ‘Q’ para um evento de chuva qualquer. Contudo, vale salientar, que apesar de um modelo preditivo muito bom, ele serve apenas para a BHRJ, uma vez que é puramente matemático e que não leva em consideração qualquer característica da bacia e da precipitação em si, tais como relevo, solo, intensidade e duração da chuva, cobertura vegetal e umidade antecedente.

4.3 Métodos de determinação do parâmetro CN

A determinação de um valor de CN único e representativo para uma bacia hidrográfica é um ponto crucial para obter êxito na estimativa do escoamento superficial direto. Diante disso, vários métodos de determinação do CN estão apresentados abaixo, seja através da espacialização dos valores,

através de eventos chuva-deflúvio observados, ou através do ordenamento crescente e individual dos dados de chuva-deflúvio observados.

Pela aplicação destes métodos, pode-se ainda variar os valores da abstração inicial considerada, e também as condições de umidade antecedente em que cada evento foi classificado.

Diante disso, os resultados abaixo se referem à aplicação de 29 métodos de determinação do valor de CN para a BHRJ.

4.3.1 Parâmetro CN obtido espacialmente com base na tabela do NEH-4 – Métodos M1 e M2

A Figura 11 apresenta a distribuição espacial do parâmetro CN para a BHRJ, obtidos através da primeira metodologia descrita, nas quais os valores de CN empregados estão apresentados na Tabela 6.

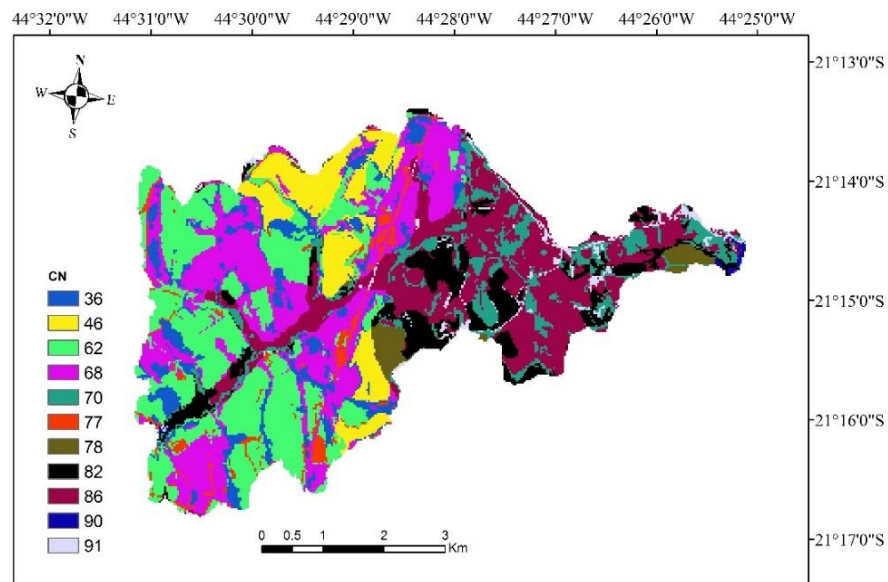


Figura 11 Variabilidade espacial do parâmetro CN para a BHRJ baseado na tabela do NEH-4 SCS (1956, 1964, 1971, 1985, 1993, 2004), adaptados de Huffman et al. (2011) e Mello e Silva (2013)

Tabela 6 Valores de CN e respectivas áreas de ocorrência na BHRJ

Uso do solo	CN para cada grupo hidrológico			
	A	Área (%)	C	Área (%)
Vegetação Nativa	36	7,86	70	7,38
Agricultura	62	22,36	82	8,55
Solo exposto	77	3,03	91	1,86
Área Urbana	-	-	90	0,25
Eucalipto	46	8,36	78	1,95
Pastagem	68	20,16	86	18,24

Os valores de CN variaram de 36 a 91, sendo estes associados às combinações de vegetação nativa com Latossolo, e solo exposto com solos associados ao grupo hidrológico C (Cambissolo Háplico e Neossolo Flúvico), respectivamente.

Verifica-se pela Tabela 6 e pela Figura 11, que não houve a predominância de um único valor de CN, tornando-se assim, difícil obter um valor representativo para a bacia sem a aplicação de outras técnicas e aproximações.

Para a determinação de um único CN na condição AMC II, fez-se uma ponderação pela aplicação dos dados da Tabela 6 na Equação 13, obtendo-se assim, um valor de CN médio igual a 67,9. É importante observar que este valor retirado da tabela proposta inicialmente pelo Serviço de Conservação de Solos dos Estados Unidos (SCS-USA), se refere à condição de umidade II (AMC II), e que, através das Equações 9 e 10, foram obtidos os valores para as condições de umidade I e III, sendo equivalentes a 47 e 82,9, respectivamente.

Portanto, para a estimativa do escoamento superficial direto considerar-se-á a condição de umidade antecedente a cada evento.

O resultado da estimativa de Q pela aplicação do CN determinado através do mapeamento, e utilizando a Equação 7, com $\lambda = 0,2$, denominado de M1, está apresentado no Gráfico 12.

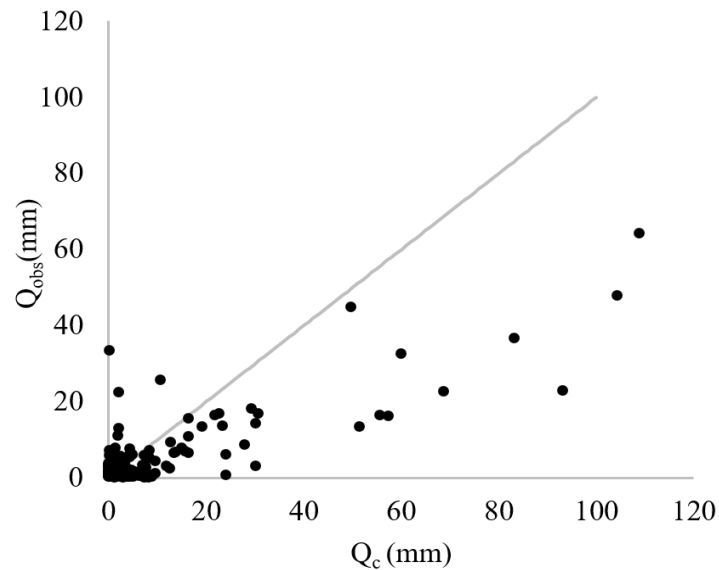


Gráfico 12 Valores de Q estimados pelo método M1 comparados aos observados na BHRJ

Pode ser visto que a aplicação da Equação 7 em sua forma original, ou seja, considerando um valor de $\lambda = 0,2$ para a estimativa de Q , há uma nítida superestimativa do deflúvio.

Os valores dos coeficientes RMSE, C_{NS} , e Pbias para a aplicação do CN mapeado, considerando $\lambda = 0,2$, foram de 12,56, -0,87 e -68,77, respectivamente.

Estes resultados demonstram que mesmo com o auxílio do Sistema de Informações Geográficas (SIG), é inviável obter um único valor de CN médio e hidrologicamente representativo para a estimativa do deflúvio na BHRJ quando se considera $\lambda = 0,2$. Assim, torna-se necessário a aplicação de modelos que ajustam um valor de CN com base em dados de chuva-deflúvio observados, assim como a consideração de outras possíveis relações entre I_a e S (MELLO et

al., 2003; WOODWARD et al., 2003; SHI et al., 2009; D'ASARO; GRILLONE, 2014).

Ainda considerando os valores de CN mapeados, o modelo proposto por Woodward et al. (2003) foi aplicado com o intuito de melhorar a aproximação dos valores de Q estimados em relação aos observados. Nesse método, denominado M2, na aplicação da Equação 6, o valor de λ passa a ser de 0,05. Contudo, como os valores de CN tabelados foram desenvolvidos para $\lambda = 0,2$ (SCS, 1956, 1964, 1971, 1985, 1993, 2004), a Equação 15 teve de ser aplicada para transformar os valores de $S_{0,2}$ em $S_{0,05}$. O resultado do ajuste pelo método M2 pode ser observado no Gráfico 13.

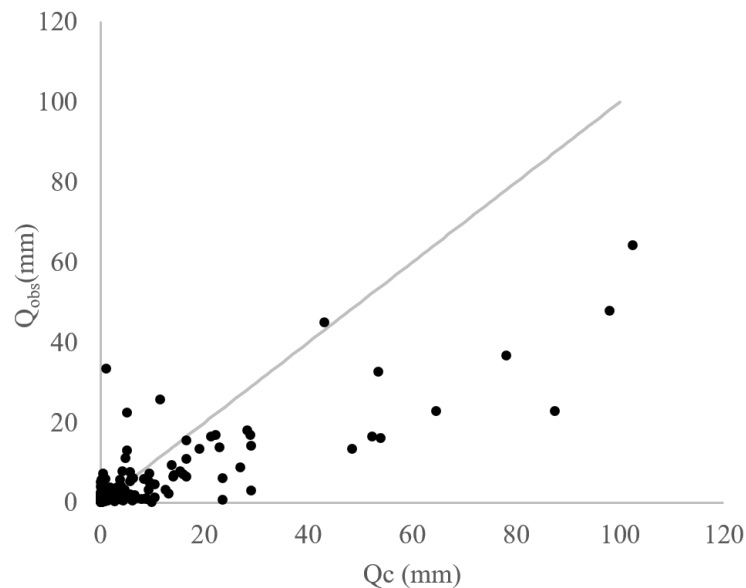


Gráfico 13 Valores de Q estimados pelo método M2 comparados aos observados na BHRJ

Os valores dos coeficientes RMSE, C_{NS} , e Pbias para o método M2 foram de 11,42, -0,55 e -56,51, respectivamente.

4.3.2 Parâmetro CN obtido através de eventos chuva-deflúvio não ordenados – Métodos M3 a M14

Uma vez verificado que a consideração de um único valor de CN obtido através da espacialização de valores tabelados não foi satisfatória, as análises agora descritas são embasadas em valores de CN obtidos através de eventos chuva-deflúvio observados.

A primeira metodologia que tem como base os eventos chuva-deflúvio é realizada através da aplicação das Equações 17 e 18 para o cálculo do valor de CN de cada evento considerando a abstração inicial separada através da relação hietograma-hidrograma. É importante salientar, que para os métodos de determinação de CN realizados através de eventos chuva-deflúvio observados, é obtido um único valor de CN para cada evento, portanto, 166 valores de CN para cada um dos métodos de M3 a M14, foram obtidos para a BHRJ.

Após a determinação de um valor único de CN para cada evento, fez-se então a separação dos mesmos de acordo com a umidade antecedente previamente considerada, obtendo-se então a moda, média e a mediana para cada AMC considerado, resultando em nove valores de CN que estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 Valores de CN calculados pelos métodos M3, M4 e M5 e suas respectivas estatísticas de precisão para a estimativa de Q

$\lambda = \text{variável}$	CN_I	CN_{II}	CN_{III}	RMSE	C_{NS}	Pbias
M3	31,6	37,4	50,7	4,83	0,72	6,09
M4	28,0	34,0	63,0	7,12	0,40	-15,55
M5	27,9	34,5	53,6	5,22	0,68	6,72

A aplicação da média dos valores obtidos para a estimativa do escoamento superficial direto foi denominada de método M3, da moda, M4 e da mediana de M5.

Como o valor de λ foi variável em cada evento, a estimativa de Q através da Equação 6 foi feita com $\lambda = 0,02$, obtido através da média das relações entre Ia e S de todos os eventos, e a aplicação dos valores de CN apresentados na Tabela 7 foi feito levando em consideração à condição de umidade antecedente que o evento chuva-deflúvio se inclui.

Pelos valores de RMSE, C_{NS} , e Pbias, é possível concluir que a melhor estimativa dos dados foi feita considerando a média do CN obtida entre todos os eventos. O resultado da estimativa pelo método M3 está representado no Gráfico 14, do M4 no Gráfico 15, e do M5 no Gráfico 16.

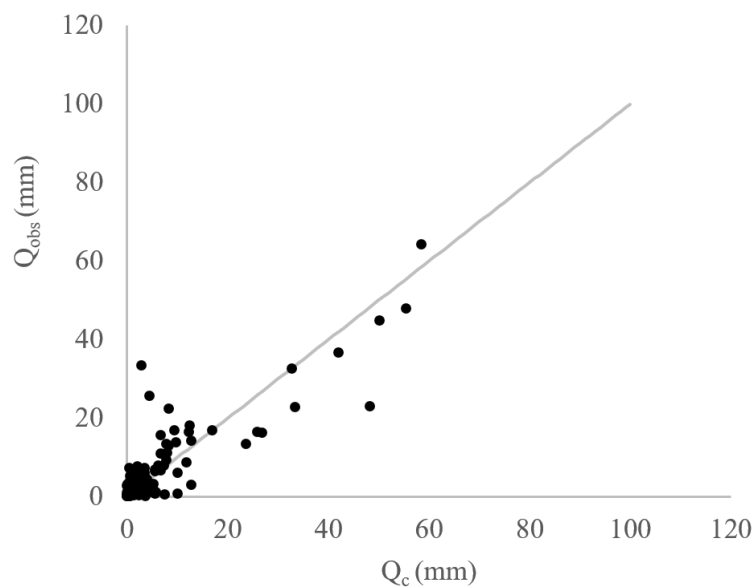


Gráfico 14 Valores de Q estimados pelo método M3 comparados aos observados na BHRJ

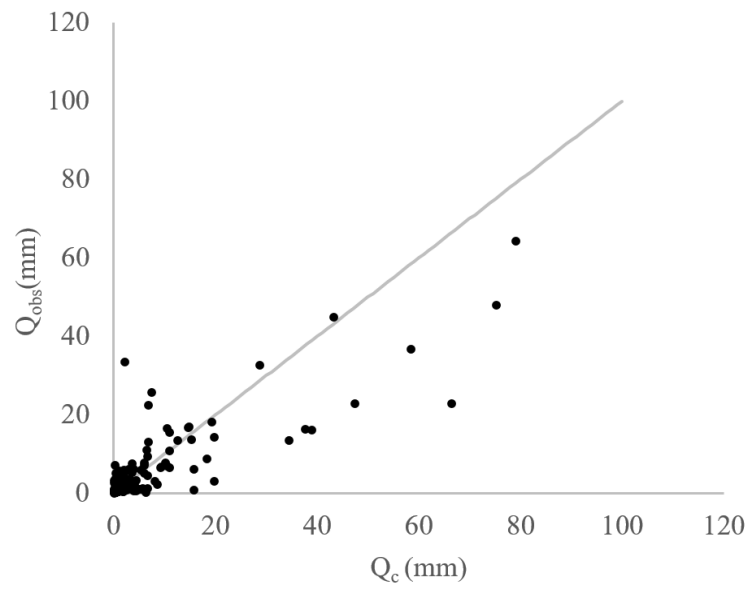


Gráfico 15 Valores de Q estimados pelo método M4 comparados aos observados na BHRJ

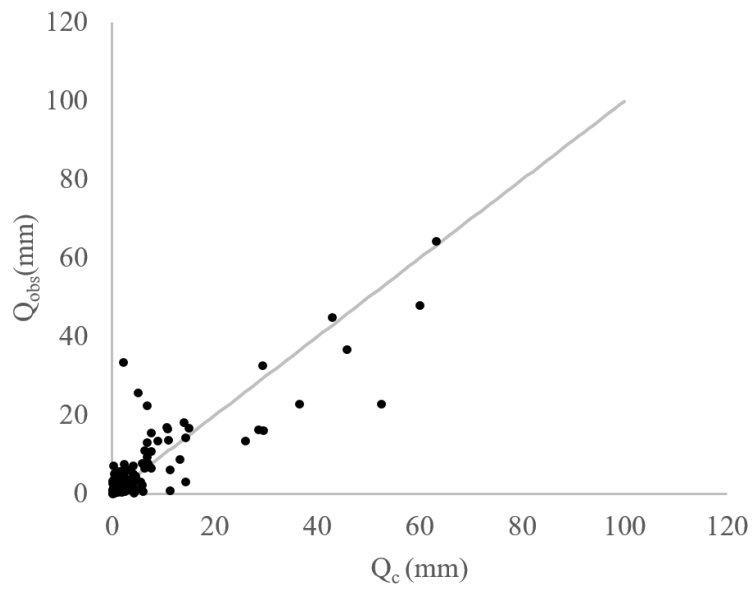


Gráfico 16 Valores de Q estimados pelo método M5 comparados aos observados na BHRJ

Considerando agora que a abstração inicial (Ia) ao invés de ser variável para cada evento (conforme resultado anterior), foi fixada como sendo uma parcela do armazenamento potencial de água no solo (S). Através da Equação 21, calculou-se o CN para cada evento chuva-deflúvio observado para $\lambda = 0,2$. E assim como na metodologia anterior, os valores da moda, média e mediana foram obtidos considerando também as condições de umidade antecedente na qual o evento está vinculado. Estes são os métodos M6, M7 e M8.

Sendo assim, para $\lambda = 0,2$ os resultados dos valores de CN adotados, assim como os coeficientes RMSE, C_{NS} , e Pbias podem ser verificados na Tabela 8.

Tabela 8 Valores de CN calculados com base nos métodos M6, M7 e M8 e suas respectivas estatísticas de precisão para a estimativa de Q

$\lambda = 0,2$	CN_I	CN_{II}	CN_{III}	RMSE	C_{NS}	Pbias
M6	69,0	70,7	74,0	9,99	-0,18	-49,21
M7	70,0	75,0	78,0	11,98	-0,70	-78,90
M8	69,1	72,2	74,9	10,44	-0,29	-56,03

Os valores da média dos CN calculados para cada AMC, quando empregados na estimativa do escoamento superficial direto foram os que melhor se ajustaram aos dados de Q observados, conforme pode ser analisado na Tabela 8.

Este método de determinação do CN foi denominado M6, considerando os valores da média, M7, da moda, e M8, da mediana dos dados de CN calculados. Os respectivos ajustes podem ser visualizados nos Gráficos 17, 18 e 19, respectivamente.

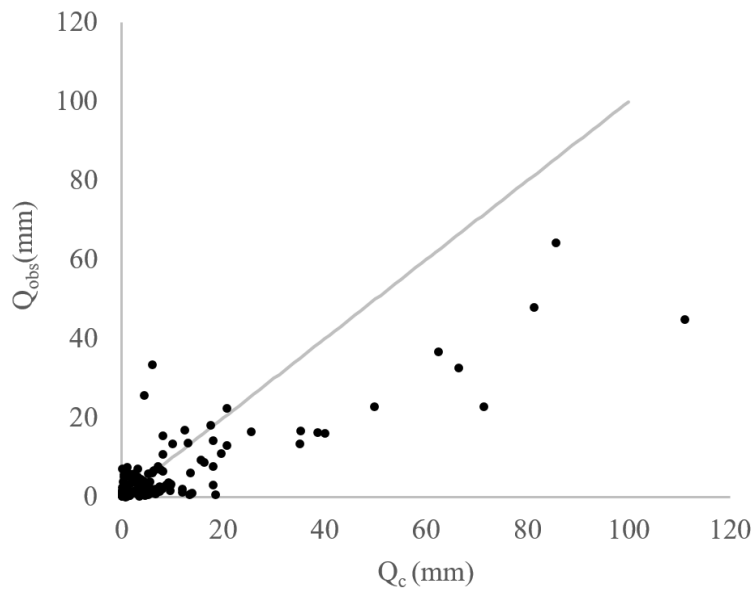


Gráfico 17 Valores de Q estimados pelo método M6 comparados aos observados na BHRJ

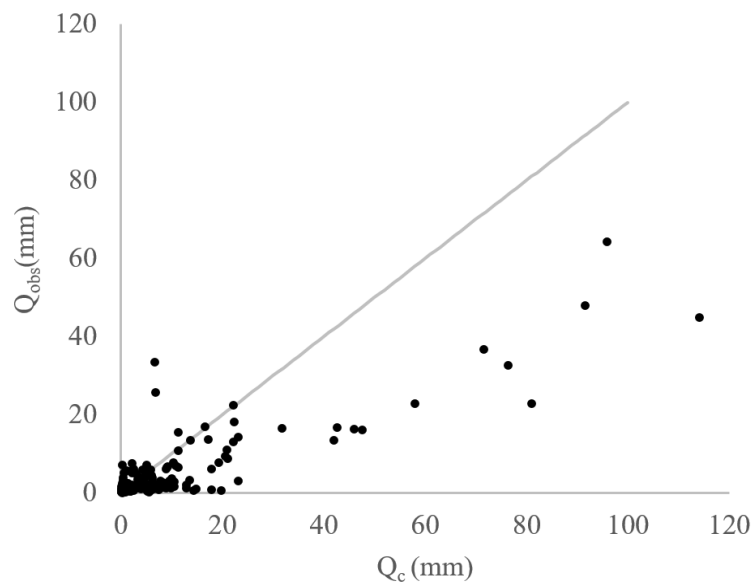


Gráfico 18 Valores de Q estimados pelo método M7 comparados aos observados na BHRJ

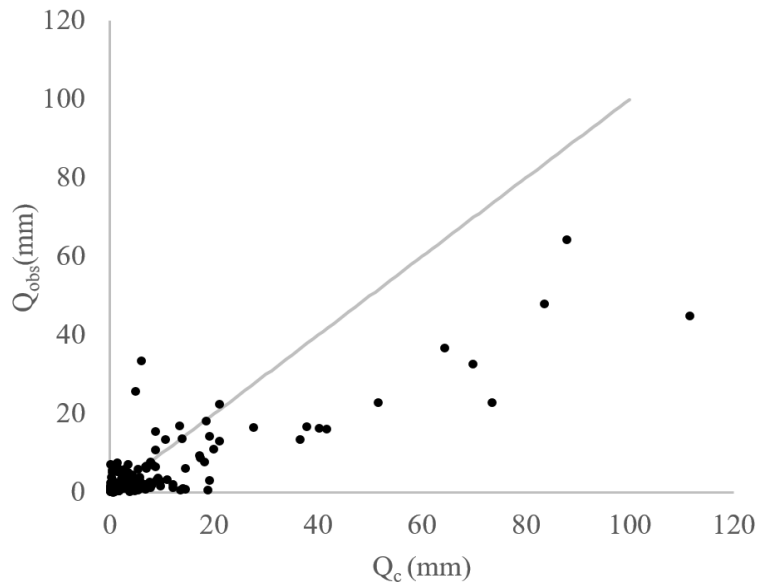


Gráfico 19 Valores de Q estimados pelo método M8 comparados aos observados na BHRJ

Os métodos M9, M10 e M11, correspondem à média, moda e mediana dos valores de CN, respectivamente. Estes seguem metodologia semelhante à adotada pelos métodos M6, M7 e M8, contudo, considerando $\lambda = 0,02$, ou seja, o valor da média da abstração inicial obtida pela separação dos eventos.

Assim, o uso da Equação 24 se faz necessário, uma vez que, conforme visto na metodologia, ela pode ser utilizada para calcular S com base em qualquer valor de λ considerado.

A Tabela 9 apresenta os valores de CN para os três modelos, assim como os coeficientes RMSE, C_{NS} , e Pbias calculados.

Tabela 9 Valores de CN calculados pelo M9, M10 e M11 e suas respectivas estatísticas de precisão para a estimativa de Q

$\lambda = 0,02$	CN _I	CN _{II}	CN _{III}	RMSE	C _{NS}	Pbias
M9	38,0	41,4	52,6	5,21	0,68	-10,35
M10	28,0	37,0	54,0	5,25	0,67	4,28
M11	35,9	41,5	54,0	5,30	0,67	-10,02

O resultado dos métodos M9, M10 e M11, podem ser visualizados nos Gráficos 20, 21 e 22.

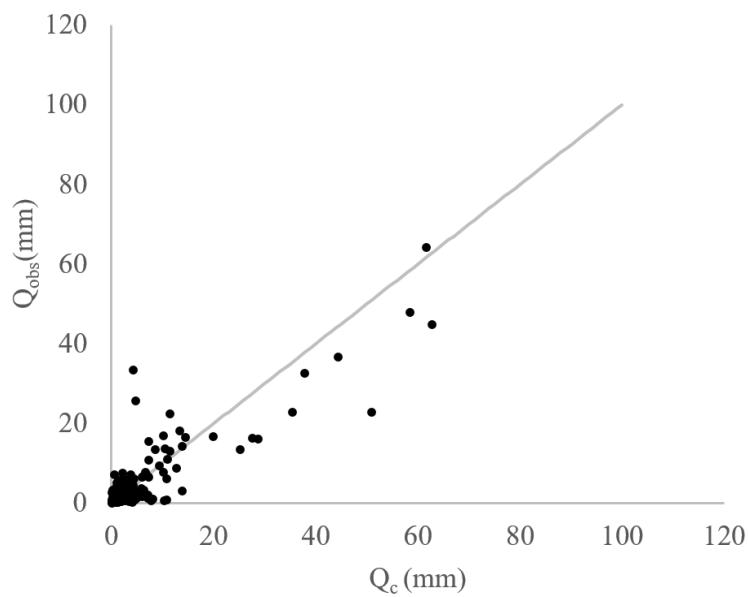


Gráfico 20 Valores de Q estimados pelo método M9 comparados aos observados na BHRJ

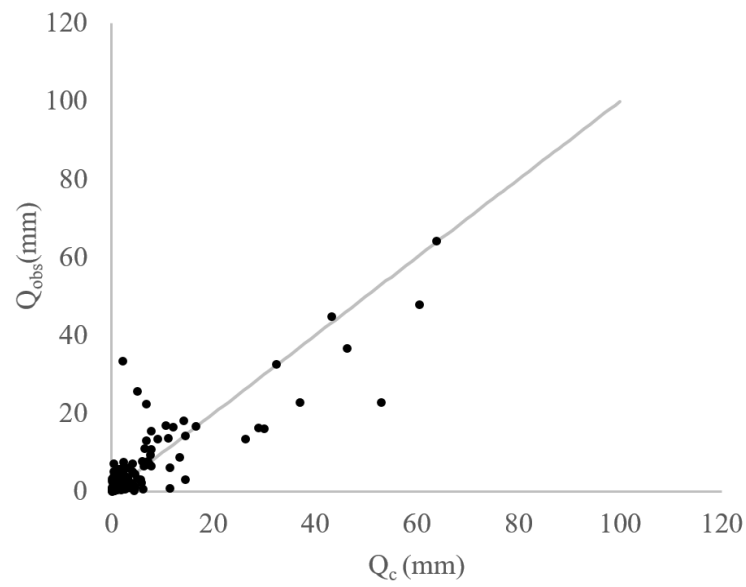


Gráfico 21 Valores de Q estimados pelo método M10 comparados aos observados na BHRJ

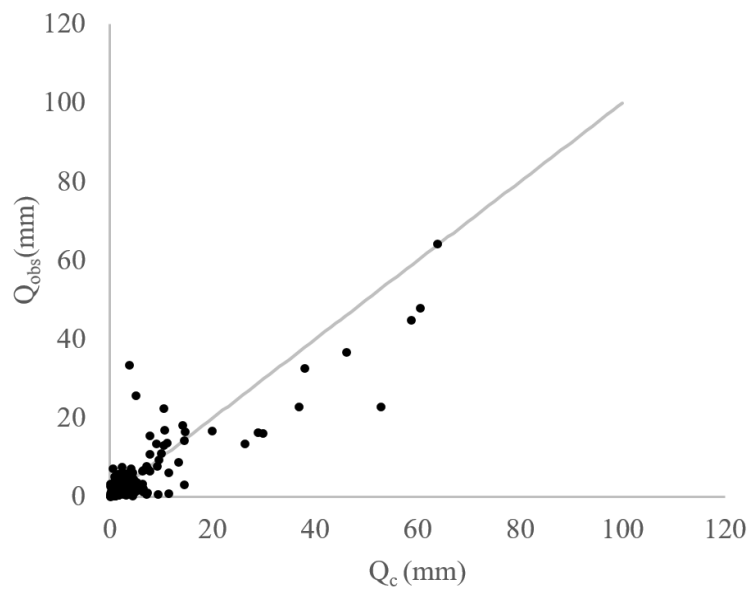


Gráfico 22 Valores de Q estimados pelo método M11 comparados aos observados na BHRJ

Os resultados a seguir, se referem aos três últimos métodos de determinação do CN, que se baseiam em dados de chuva-deflúvio não ordenados, correspondendo aos métodos M12, M13 e M14. São baseados na mesma metodologia anterior, porém, com $\lambda = 0,05$, conforme proposto por Woodward et al. (2003).

A Tabela 10 apresenta os valores de CN para os três modelos, assim como os coeficientes RMSE, C_{NS} , e Pbias calculados.

Tabela 10 Valores de CN calculados pelo M9, M10 e M11 e suas respectivas estatísticas de precisão para a estimativa de Q

$\lambda = 0,05$	CN_I	CN_{II}	CN_{III}	RMSE	C_{NS}	Pbias
M12	47,9	51,0	59,2	6,34	0,52	-21,36
M13	40,0	48,0	61,0	6,16	0,55	-9,28
M14	46,4	49,7	59,9	6,30	0,53	-18,92

Os resultados de M12, M13, e M14, os quais são referentes à média, moda e mediana dos valores de CN calculados, podem ser visualizados nos Gráficos 23, 24 e 25 respectivamente.

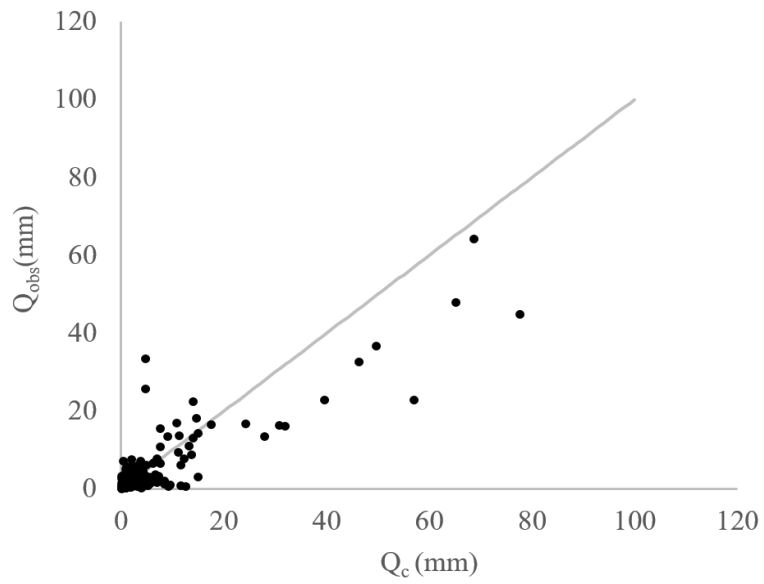


Gráfico 23 Valores de Q estimados pelo método M12 comparados aos observados na BHRJ

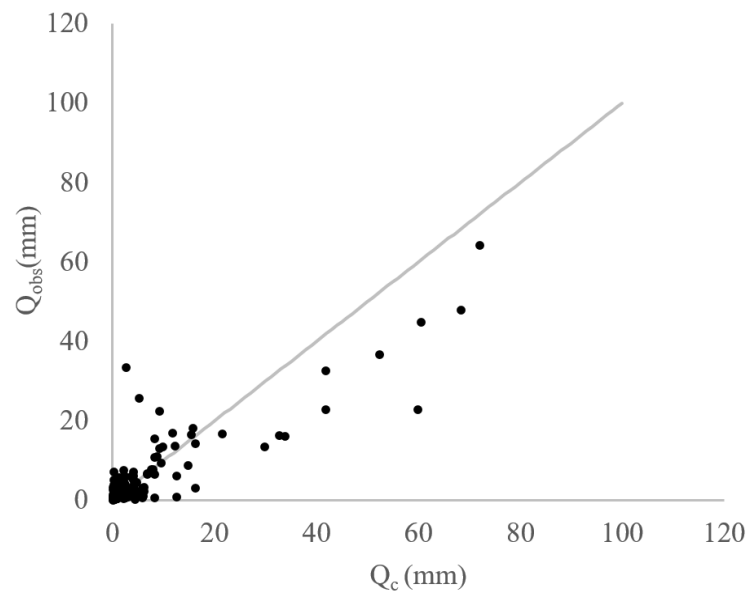


Gráfico 24 Valores de Q estimados pelo método M13 comparados aos observados na BHRJ

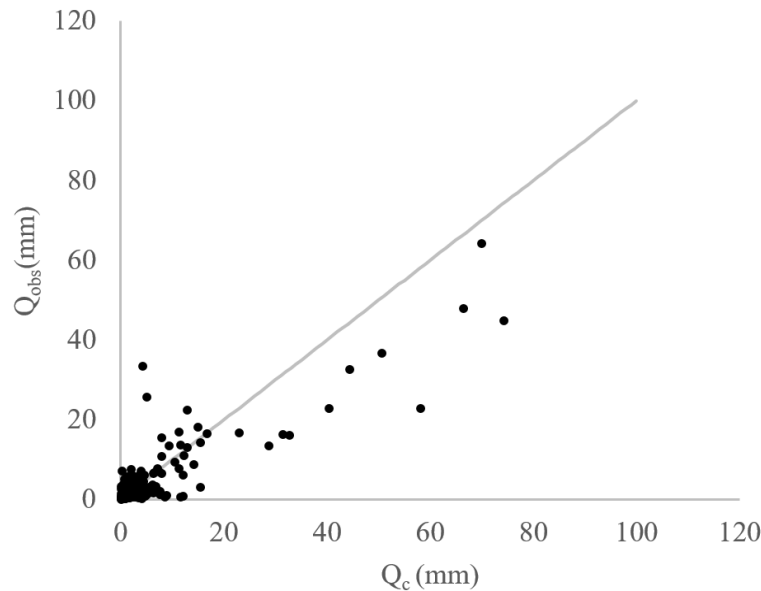


Gráfico 25 Valores de Q estimados pelo método M14 comparados aos observados na BHRJ

4.3.3 Parâmetro CN obtido através da metodologia baseada em eventos chuva-deflúvio ordenados – M15 a M29

A determinação dos valores de CN obtidos através dos modelos M15 a M29 são, assim como os métodos M3 a M14, obtidos através de eventos chuva-deflúvio, contudo, os modelos descritos agora são calibrados antes da aplicação propriamente dita para a estimativa do escoamento superficial direto, onde os dados de chuva e de deflúvio são inicialmente ordenados de forma crescente e independente.

A metodologia denominada de ‘assintótica’, foi apresentada por Hawkins (1993), e está descrita no item 3.5.6, e corresponde à tendência dos valores de CN se aproximarem de um valor constante à medida que os eventos de precipitação aumentam significativamente.

Esta foi subdividida em 6 diferentes métodos, M15 a M20, considerando três valores diferentes de λ , e depois, aplicada apenas para os maiores eventos, conforme recomendações descritas em Hawkins (1993, 2001) e Soulis e Valiantzas (2012).

Dos três comportamentos descritos nas metodologias apresentadas por Hawkins (1993), a BHRJ se enquadrou no mais usual, denominado *standard behaviour* (comportamento padrão). Esse comportamento ocorre quando os valores de CN tendem a se aproximar de um valor constante com a ocorrência de eventos de precipitações maiores.

Conforme observado no Gráfico 26, o método denominado ‘assintótico’ foi calibrado para três valores de λ . A aplicação do valor inicialmente proposto pelo método CN-SCS, $\lambda = 0,2$ foi denominado de M15. O valor proposto por Woodward et al. (2003) e utilizado por vários autores, $\lambda = 0,05$, foi denominado de M16. Por fim, o método M17, com $\lambda = 0,02$, obtido pela média da abstração inicial obtida para todos os eventos.

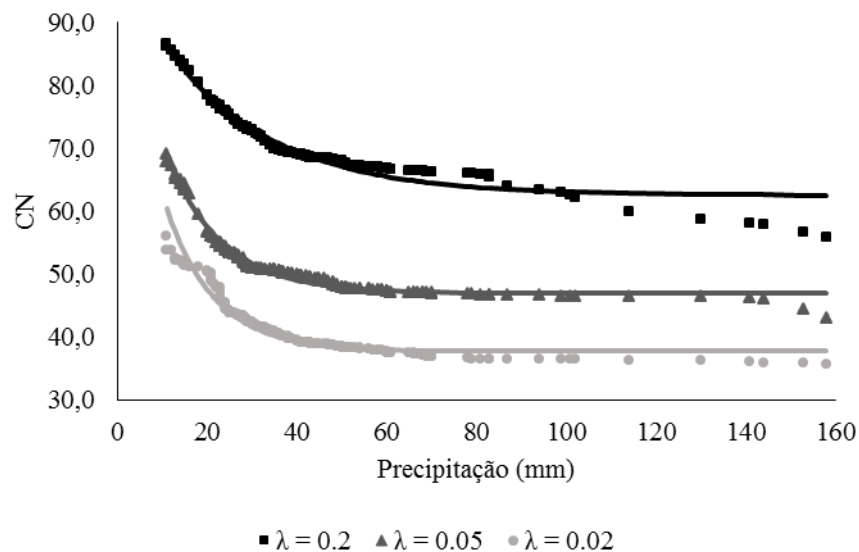


Gráfico 26 Determinação assintótica do CN para BHRJ para diferentes valores de λ

Assim, para o comportamento padrão, o ajuste dos dados deve ser feito com base na equação 25 para a obtenção do valor de CN_{∞} , e μ_1 . A Tabela 11 apresenta os valores de CN_{∞} e μ_1 para os métodos M15, M16 e M17, após o ajuste conduzido com base no método dos mínimos quadrados.

Tabela 11 Parâmetros de ajuste para a determinação assintótica do CN para a BHRJ

Método	λ	CN_{∞}	μ_1	R^2
M15	0,2	62,5	0,0421	0,98
M16	0,05	46,9	0,0805	0,99
M17	0,02	37,7	0,0921	0,95

Os procedimentos realizados para a obtenção de S e, posteriormente, de CN, para cada evento observado, foram os mesmos que os anteriores, ou seja, através da aplicação da Equação 24, que calcula CN para qualquer λ considerado.

Com a obtenção dos valores de CN_{∞} e μ_1 , a Equação 25 se transforma em:

$$CN(P) = 62,5 + 37,5 \exp(-0,0421P) \quad (44)$$

$$CN(P) = 46,9 + 53,1 \exp(-0,0805P) \quad (45)$$

$$CN(P) = 37,7 + 62,3 \exp(-0,0921P) \quad (46)$$

Sendo as Equações 44, 45 e 46 utilizadas para a obtenção dos valores de CN considerando $\lambda = 0,2$; 0,05; e 0,02, respectivamente.

Uma vantagem de se ajustar estas equações é de que o valor de CN a ser considerado na estimativa do escoamento superficial direto é função da precipitação, visto que a variabilidade deste é muito alta com a precipitação,

mesmo considerando um valor fixo de λ , conforme pode ser visualizado pelo Gráfico 27, que se assemelha ao Gráfico 26, porém, com os dados não ordenados.

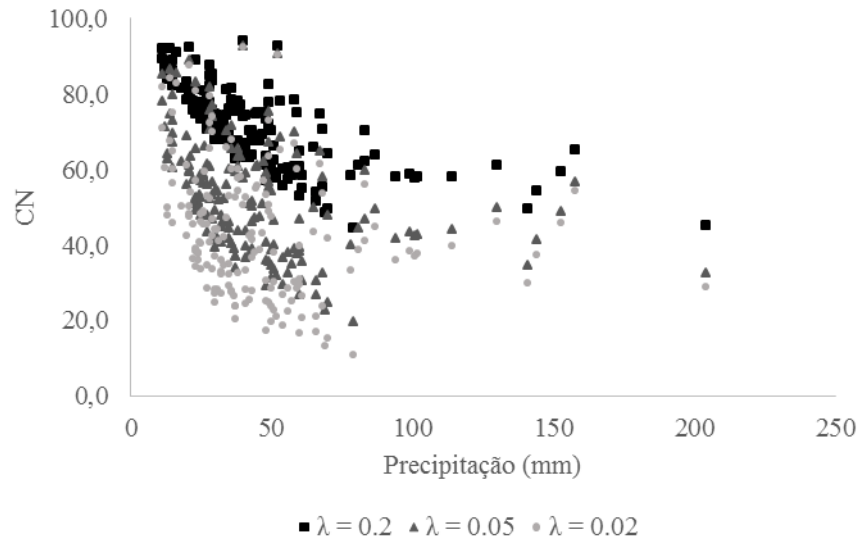


Gráfico 27 Variabilidade dos valores de CN calculados para diferentes valores de λ na BHRJ

É fato que para avaliar os métodos testados, os dados dos eventos chuva-deflúvio a serem considerados são aqueles não ordenados, uma vez que o ordenamento foi feito apenas para ajustar os valores dos parâmetros CN_{∞} e μ_1 .

Os resultados dos métodos M15, M16 e M17 estão representados na Tabela 12, em que se encontram os valores dos coeficientes de precisão estatística, RMSE, C_{NS} e Pbias.

Tabela 12 Estatísticas de precisão para estimativa de Q calculados por M15, M16 e M17

Método	RMSE	C _{NS}	Pbias
M15	6,26	0,53	-4,62
M16	5,31	0,67	4,60
M17	5,08	0,69	15,25

O ajuste dos dados de Q estimados para M15, M16 e M17 pode ser visualizado nos Gráficos 28, 29 e 30, respectivamente.

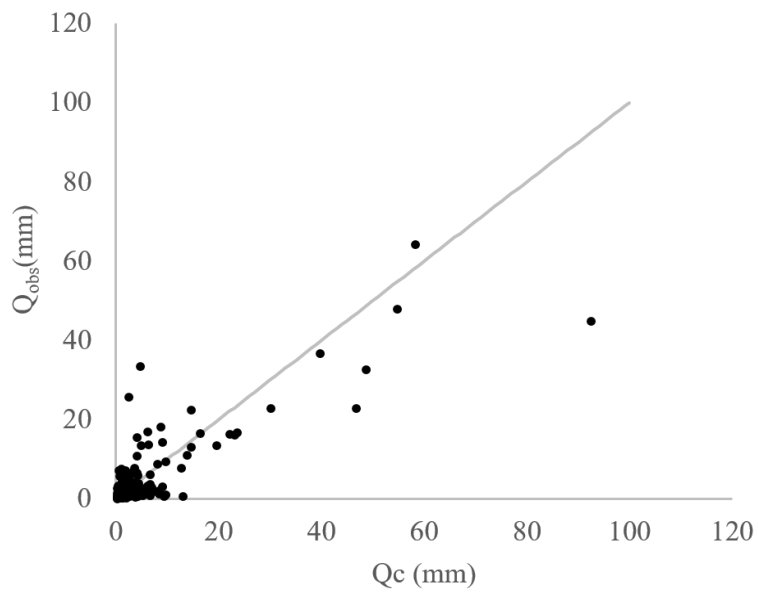


Gráfico 28 Valores de Q estimados pelo método M15 comparados aos observados na BHRJ

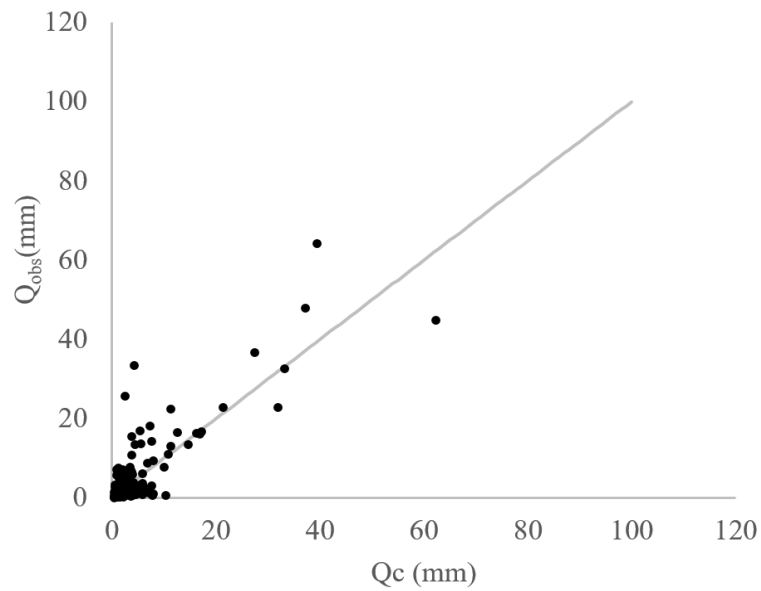


Gráfico 29 Valores de Q estimados pelo método M16 comparados aos observados na BHRJ

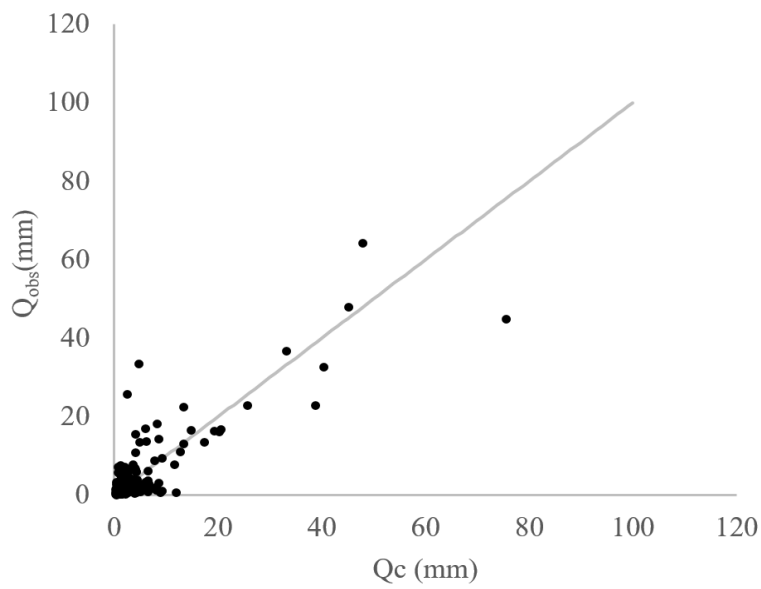


Gráfico 30 Valores de Q estimados pelo método M17 comparados aos observados na BHRJ

Aplicando a mesma metodologia descrita acima, mas considerando apenas os eventos de precipitação superiores a 60 mm, o modelo proposto por Hawkins (1993) melhora de forma considerável os resultados, conforme pode ser visto na Tabela 13, que apresenta os valores de RMSE, C_{NS} , e Pbias para M18, M19 e M20.

Para isso, os mesmos valores de CN_{∞} , μ_1 e λ foram utilizados, ou seja, o ajuste dos dados ordenados foi o mesmo, mudando apenas o coeficiente de determinação R^2 .

Tabela 13 Parâmetros de ajuste para a determinação assintótica do CN para a BHRJ e os valores das estatísticas de precisão para a estimativa de Q calculados por M18, M19 e M20

Método	λ	CN_{∞}	μ_1	R^2	RMSE	C_{NS}	Pbias
M18	0,2	62,5	0,0421	0,999	11,30	0,46	-36,59
M19	0,05	46,9	0,0805	0,998	8,41	0,70	-18,50
M20	0,02	37,7	0,0921	0,990	7,61	0,75	0,46

Os Gráficos 31, 32 e 33 mostram o resultado dos dados de escoamento superficial direto calculados pelos métodos M18, M19 e M20.

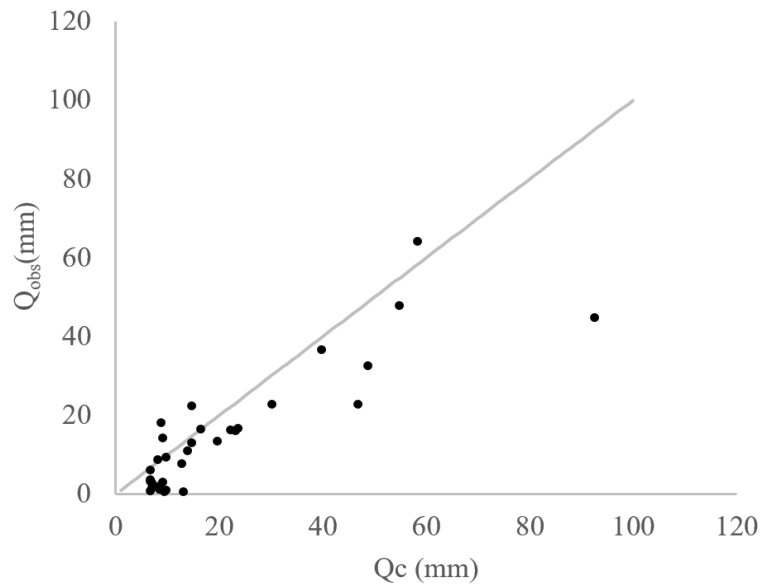


Gráfico 31 Valores de Q estimados pelo método M18 comparados aos observados na BHRJ

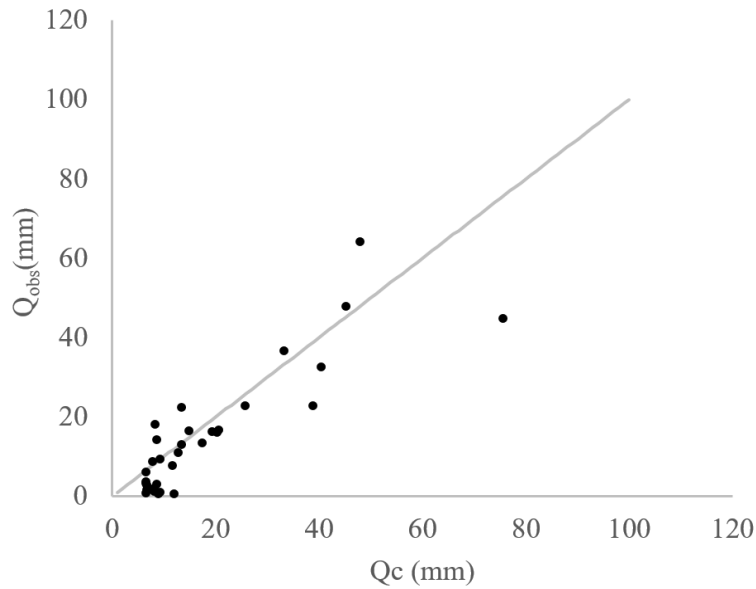


Gráfico 32 Valores de Q estimados pelo método M19 comparados aos observados na BHRJ

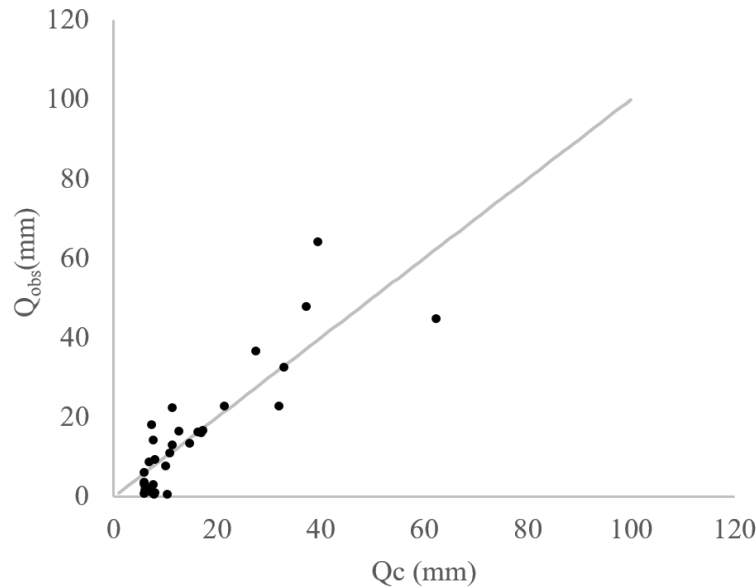


Gráfico 33 Valores de Q estimados pelo método M20 comparados aos observados na BHRJ

Ainda seguindo a metodologia do ajuste feito através dos dados ordenados, os métodos apresentados a seguir, seguiram os procedimentos descritos no item 3.5.7, denominado de *Two-CN system approach* (SOULIS; VALIANTZAS, 2012).

Os métodos M21, M22 e M23 são referentes à aplicação de todos os dados, e os métodos M24, M25 e M26 se referem apenas aos eventos de precipitação maiores que 60 mm.

A Tabela 14 apresenta os valores de CN_a , CN_b , a e R^2 ajustados para M21, 22 e 23, assim como os coeficientes RMSE, C_{NS} , e Pbias calculados.

Tabela 14 Parâmetros de ajuste para a determinação do CN através do modelo *Two-CN system approach* para a BHRJ e os valores das estatísticas de precisão para a estimativa de Q obtidos por M21, M22 e M23

Método	λ	CN _a	CN _b	a	R ²	RMSE	C _{NS}	Pbias
M21	0,2	89,9	59,2	0,113	0,971	6,43	0,51	-6,68
M22	0,05	98,7	43,1	0,030	0,995	5,17	0,68	6,52
M23	0,02	98,7	31,4	0,032	0,971	5,20	0,68	19,19

Pela Tabela 14 verifica-se que o melhor ajuste foi observado com a aplicação do método M22, que resultou em um maior C_{NS}, igual ao obtido pela aplicação do método M24, porém, com um menor valor de RMSE e Pbias.

Sabe-se que para a aplicação destes métodos, os dados de precipitação e escoamento superficial direto observados, foram ordenados individualmente, porém, para a validação dos mesmos, os parâmetros de ajuste apresentados na Tabela 14 foram aplicados aos dados originais, ou seja, não ordenados. Os Gráficos 34, 35 e 36 se referem ao ajuste dos resultados obtidos pela aplicação dos valores de CN_a, CN_b, e 'a' estimados pelos métodos M21, M22 e M23.

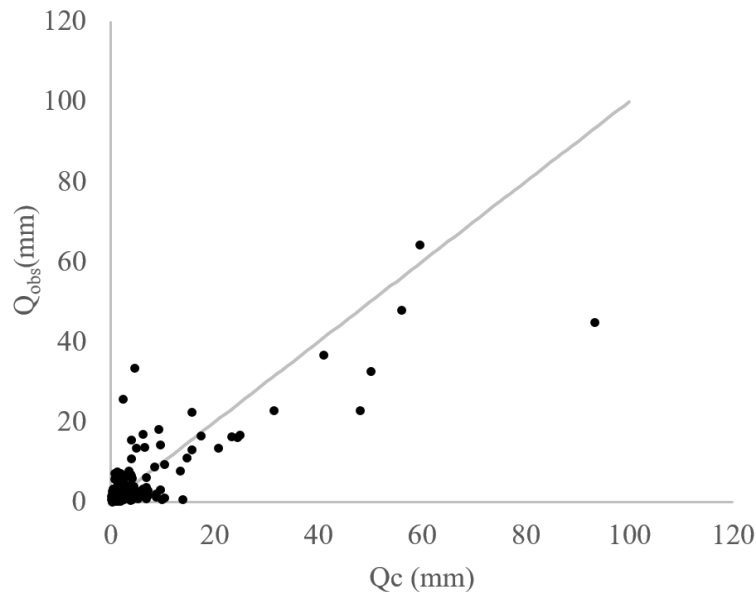


Gráfico 34 Valores de Q estimados pelo método M21 comparados aos observados na BHRJ

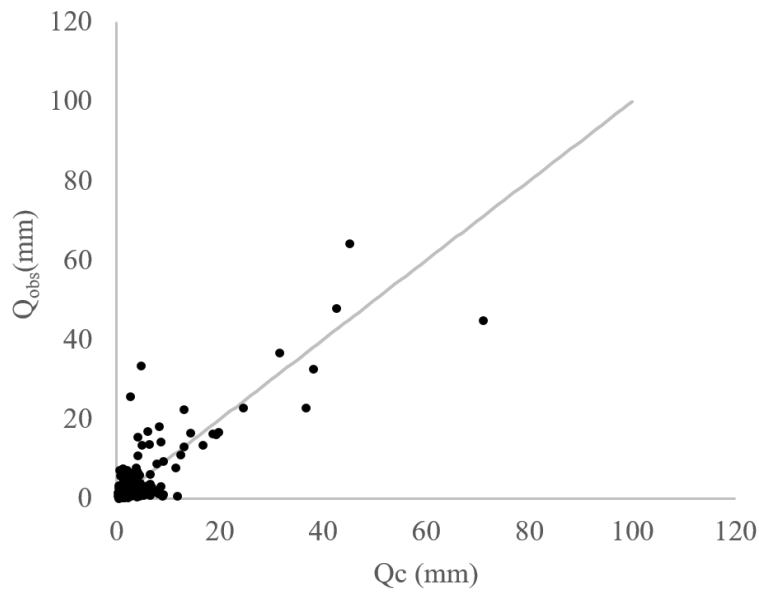


Gráfico 35 Valores de Q estimados pelo método M22 comparados aos observados na BHRJ

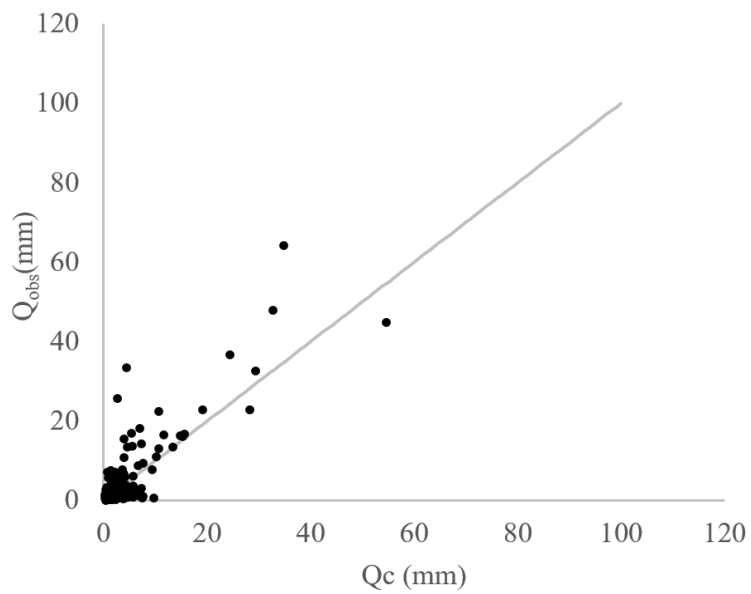


Gráfico 36 Valores de Q estimados pelo método M23 comparados aos observados na BHRJ

A Tabela 15 apresenta os valores dos coeficientes RMSE, C_{NS} , e Pbias calculados para M24, M25 e M26, considerando os mesmos valores de CN_a , CN_b , e λ ajustados para M21, M22 e M23, contudo, agora os eventos utilizados para a estimativa de Q foram aqueles com precipitações superiores a 60 mm.

Tabela 15 Valores das estatísticas de precisão para a estimativa de Q obtidos por M24, M25 e M26

Método	λ	RMSE	C_{NS}	Pbias
M24	0,2	11,76	0,41	-41,46
M25	0,05	7,97	0,73	-14,01
M26	0,02	8,04	0,72	9,18

Os Gráficos 37, 38 e 39 mostram o resultado da estimativa de Q comparativamente com o escoamento superficial direto observado para os 32 maiores eventos de chuva-deflúvio observados.

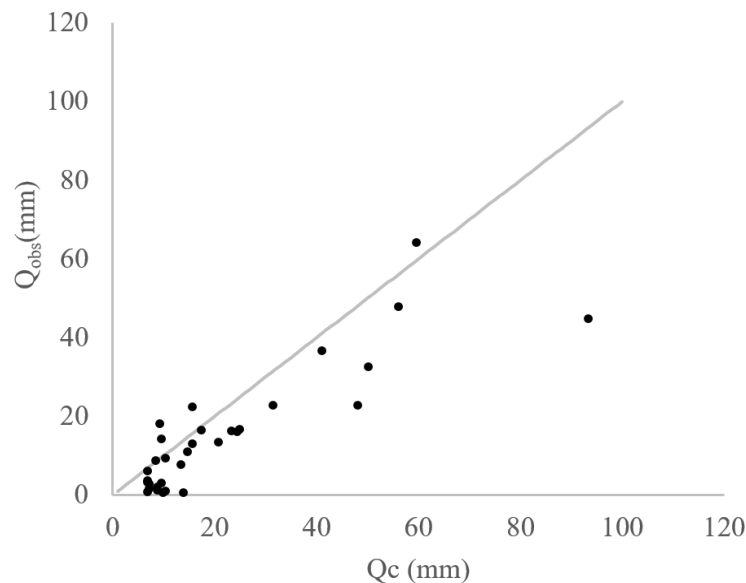


Gráfico 37 Valores de Q estimados pelo método M24 comparados aos observados na BHRJ

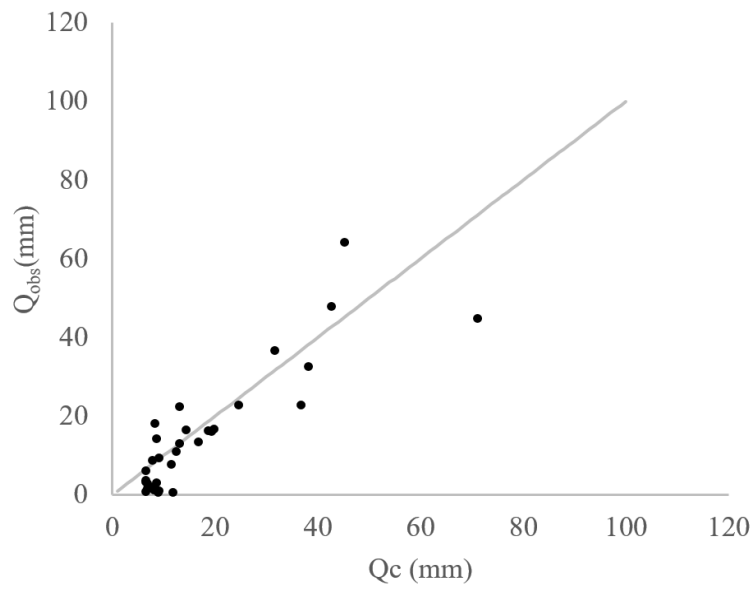


Gráfico 38 Valores de Q estimados pelo método M25 comparados aos observados na BHRJ

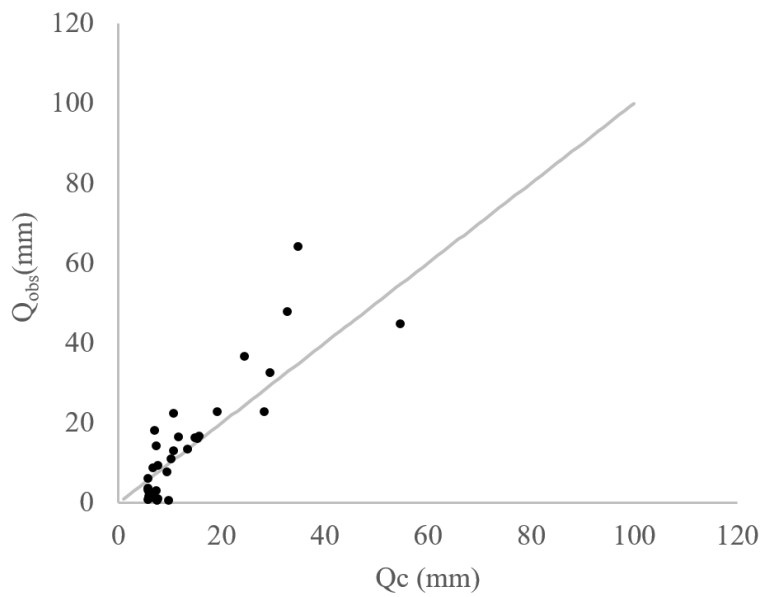


Gráfico 39 Valores de Q estimados pelo método M26 comparados aos observados na BHRJ

Por último, os resultados dos métodos denominados de M27, M28 e M29, estão apresentados na Tabela 16, onde 11 valores de CN foram ajustados com os dados chuva-deflúvio ordenados.

Os valores iniciais de CN para iteração (CN_0), foram os próprios valores de CN obtidos através da aplicação dos métodos M1 e M2 (métodos baseados nas tabelas do NEH-4).

Tabela 16 Parâmetros de ajuste para a determinação do CN para a BHRJ através dos métodos M27, M28 e M29 de acordo com o ‘Modelo Heterogêneo’

Área	Área (%)	CN_0	CN estimado		
			M27 ($\lambda = 0,2$)	M28 ($\lambda = 0,05$)	M29 ($\lambda = 0,02$)
1	8,6	82	86,71	41,38	35,31
2	22,4	62	21,61	41,23	18,84
3	20,2	68	66,44	40,73	37,74
4	3,0	77	66,44	93,13	43,83
5	1,9	91	94,00	94,00	94,00
6	18,2	86	66,44	40,84	19,17
7	7,9	36	24,26	40,14	36,08
8	2,0	78	66,44	55,69	97,45
9	8,4	46	21,46	39,88	35,85
10	7,4	70	66,44	39,67	36,16
11	0,2	90	99,00	99,00	99,00

Através destes valores, 3 mapas de CN foram gerados, um para cada método aplicado, ou seja, um para cada valor de λ considerado. Os mapas de M27, M28 e M29 estão representados pelas Figuras 12, 13 e 14, respectivamente.

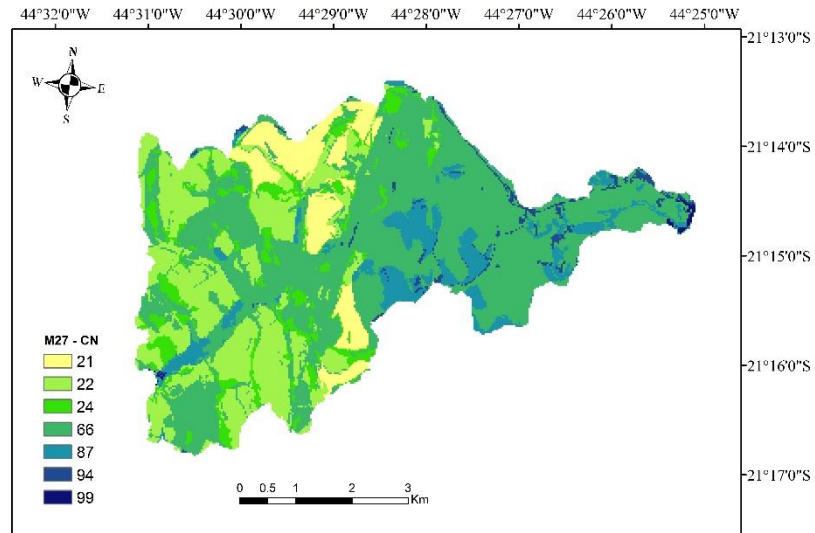


Figura 12 Mapa de CN gerado pelo ajuste do modelo heterogêneo para $\lambda = 0,2$ - M27

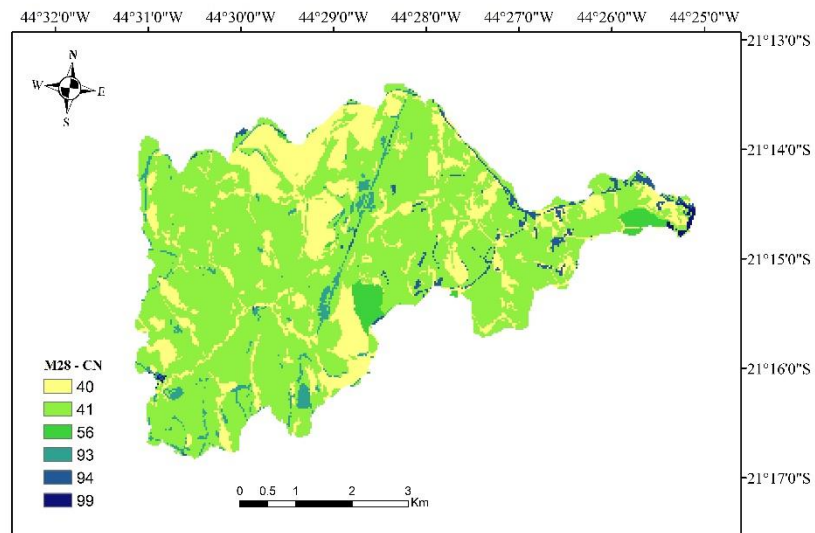


Figura 13 Mapa de CN gerado pelo ajuste do modelo heterogêneo para $\lambda = 0,05$ - M28

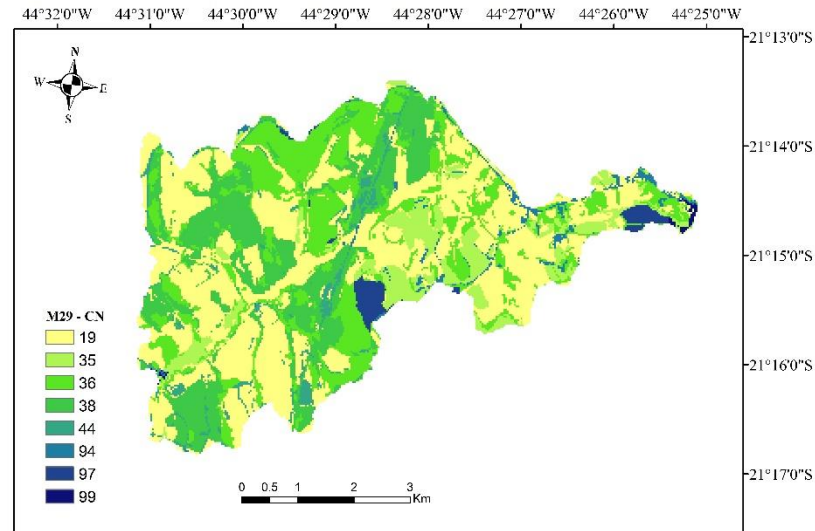


Figura 14 Mapa de CN gerado pelo ajuste do modelo heterogêneo para $\lambda = 0,02$ - M29

O resultado da estimativa do escoamento superficial direto através dos valores de CN atribuídos para M27, M28 e M29, podem ser verificados na Tabela 17, e pelos Gráficos 40, 41 e 42, respectivamente.

Tabela 17 Estatísticas de precisão para a estimativa de Q calculados por M27, M28 e M29

Método	λ	RMSE	C_{NS}	Pbias
M27	0,2	5,26	0,67	1,00
M28	0,05	5,12	0,69	7,46
M29	0,02	5,26	0,67	20,29

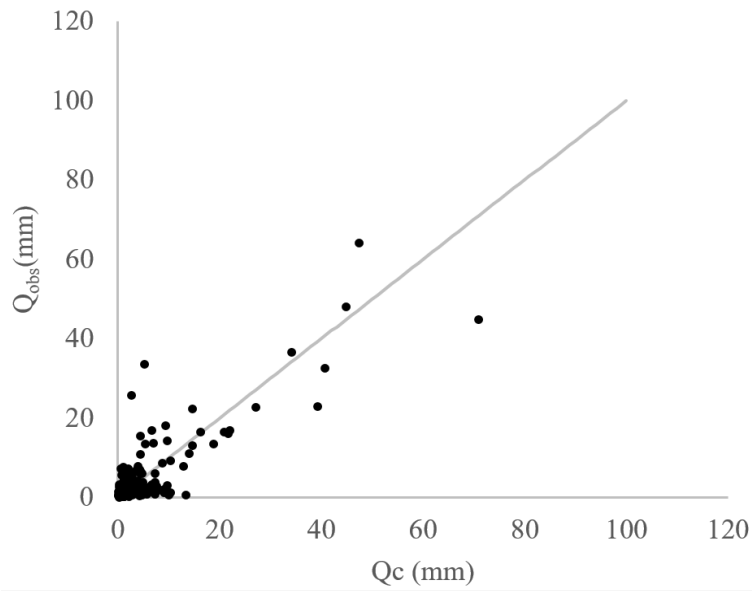


Gráfico 40 Valores de Q estimados pelo método M27 comparados aos observados na BHRJ

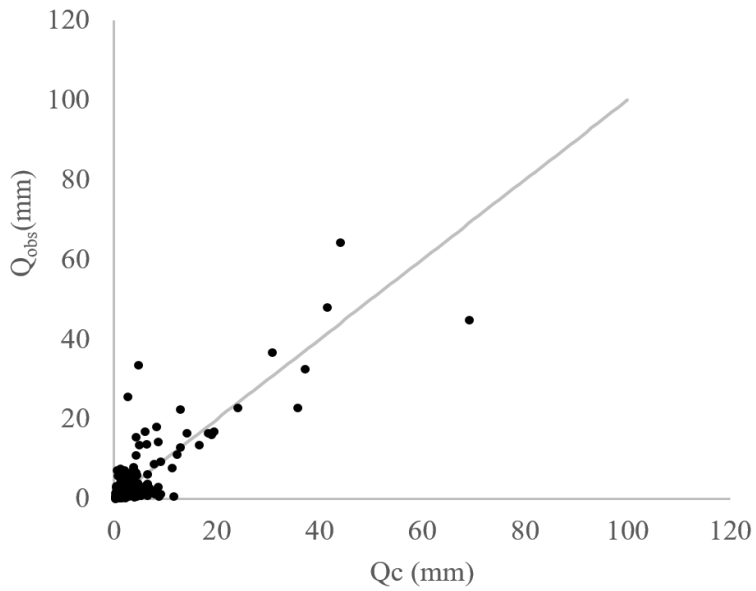


Gráfico 41 Valores de Q estimados pelo método M28 comparados aos observados na BHRJ

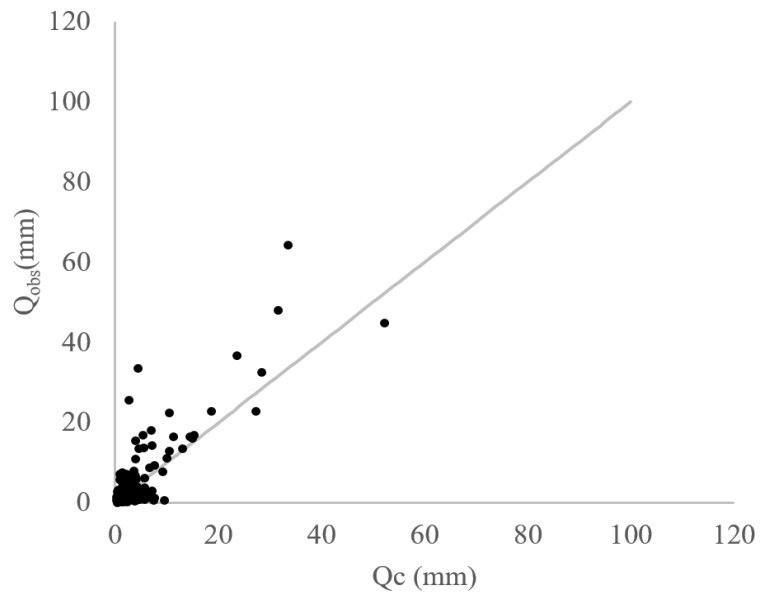


Gráfico 42 Valores de Q estimados pelo método M29 comparados aos observados na BHRJ

5 DISCUSSÃO

O cálculo dos valores de CN foi realizado através de 29 diferentes métodos, considerando 3 variações dos valores de λ na determinação do CN para aplicação e estimativa do escoamento superficial direto (Q)

No geral, cinco diferentes modelos foram utilizados para determinação do CN: baseado no mapa de CN conforme metodologia original (M1 e M2); obtido através dos eventos chuva-deflúvio observados (M3 a M14); considerando a determinação assintótica apresentada por Hawkins (1993) (M15 a M20); através do modelo denominado ‘Two CN model’ proposto por Soulis e Valiantzas (2012) (M21 a M26); e por último, pela aplicação da equação proposta por Soulis e Valiantzas (2013), que calibra os valores de CN para cada combinação existente entre o uso do solo e o grupo hidrológico (M21 a M29), chamado de ‘Modelo Heterogêneo’.

Para uma análise mais concisa, com o objetivo de facilitar a discussão sobre os 29 métodos de determinação dos valores de CN para a BHRJ, as Tabelas 18, 19 e 20 reúnem os dados apresentados anteriormente com as estatísticas de precisão aplicadas.

A Tabela 18 se refere aos métodos aplicados com o valor de CN obtido através do mapa, e através dos eventos de chuva-deflúvio observados, ou seja, os métodos M1 a M14.

Tabela 18 Valores de CN calculados e suas respectivas estatísticas de precisão para a estimativa de Q – M1 a M14

Método	CN	λ	Estatística de precisão			Parâmetro CN		
			RMSE	C_{NS}	Pbias	I	II	III
M1	Mapa	0,20	12,56	-0,87	-68,77	47,00	67,90	82,90
M2	Mapa	0,05	11,42	-0,55	-56,51	47,00	67,90	82,90
M3	Média	0,02	4,83	0,72	6,09	31,57	37,38	50,69
M4	Moda	0,02	7,12	0,40	-15,55	28,00	34,00	63,00
M5	Mediana	0,02	5,22	0,68	6,72	27,86	34,49	53,64
M6	Média	0,20	9,99	-0,18	-49,21	68,95	70,73	73,96
M7	Moda	0,20	11,98	-0,70	-78,90	70,00	75,00	78,00
M8	Mediana	0,20	10,44	-0,29	-56,03	69,12	72,23	74,87
M9	Média	0,02	5,21	0,68	-10,35	37,96	41,38	52,60
M10	Moda	0,02	5,25	0,67	4,28	28,00	37,00	54,00
M11	Mediana	0,02	5,30	0,67	-10,02	35,95	41,54	53,96
M12	Média	0,05	6,34	0,52	-21,36	47,95	50,97	59,20
M13	Moda	0,05	6,16	0,55	-9,28	40,00	48,00	61,00
M14	Mediana	0,05	6,30	0,53	-18,92	46,35	49,69	59,90

A Tabela 19 contém os resultados da metodologia proposta por Hawkins (1993), em que os valores de CN são obtidos em função da precipitação (métodos M15 a M20).

Tabela 19 Valores de CN calculados e suas respectivas estatísticas de precisão para a estimativa de Q – M15 a M20

Método	Obtenção CN	λ	Estatística de precisão			Parâmetro CN		
			RMSE	C _{NS}	Pbias	CN _∞	μ_1	R ²
M15	Assintótica	0,20	6,26	0,53	-4,62	62,51	0,042	0,975
M16	Assintótica	0,05	5,31	0,67	4,60	46,94	0,080	0,989
M17	Assintótica	0,02	5,08	0,69	15,25	37,75	0,092	0,946
M18	P > 60 mm	0,20	11,30	0,46	-36,59	62,51	0,042	0,999
M19	P > 60 mm	0,05	8,41	0,70	-18,50	46,94	0,080	0,998
M20	P > 60 mm	0,02	7,61	0,75	0,46	37,75	0,092	0,990

Finalmente, os resultados da Tabela 20, se basearam nos métodos que consideraram a obtenção do CN através do modelo *two CN model* e do modelo heterogêneo (métodos M21 a M29).

Tabela 20 Valores de CN calculados e suas respectivas estatísticas de precisão para a estimativa de Q – M21 a M29

Método	CN	λ	Estatística de precisão			Parâmetro CN			
			RMSE	C _{NS}	Pbias	Cna	CNb	a	R ²
M21	Two CN	0,20	6,43	0,51	-6,68	89,95	59,19	0,113	0,971
M22	Two CN	0,05	5,17	0,68	6,52	98,73	43,08	0,030	0,995
M23	Two CN	0,02	5,20	0,68	19,19	98,74	31,37	0,032	0,971
M24	P > 60 mm	0,20	11,76	0,41	-41,46	89,95	59,19	0,113	0,971
M25	P > 60 mm	0,05	7,97	0,73	-14,01	98,73	43,08	0,030	0,995
M26	P > 60 mm	0,02	8,04	0,72	9,18	98,74	31,37	0,032	0,971
M27	Het.*	0,20	5,26	0,67	1,00	-	-	-	0,991
M28	Het.	0,05	5,12	0,69	7,46	-	-	-	0,992
M29	Het.	0,02	5,26	0,67	20,29	-	-	-	0,971

* Het. = Modelo Heterogêneo

A aplicação de um CN médio obtido a partir de um mapa (M1 e M2) não apresentou bons resultados, sendo que o Pbias mostrou forte tendência de

superestimativa dos dados de escoamento superficial direto, visto que os valores de -68,77 e -56,51% foram encontrados para $\lambda = 0,2$ e $\lambda = 0,05$, respectivamente. Estes valores estão fora da aceitabilidade proposta por Moriasi et al. (2007), que consideram aceitável valores de Pbias variando de +/- 25%. Resultado similar foi observado por Ajmal et al. (2015), que aplicaram cinco diferentes métodos de determinação do CN, e o método baseado em valores de CN obtidos pela tabela do NEH-4 foi o que apresentou os piores resultados na estimativa de Q, considerando todas as 25 bacias hidrográficas estudadas. Seus estudos apontaram ainda, que o método CN-SCS em sua forma original, ou seja, com os valores de CN obtidos pela tabela do NEH-4, considerando $\lambda = 0,2$, apresentou os mais elevados valores de RMSE, e os menores valores de C_{NS} .

Contudo, é possível observar que para a BHRJ o M2 (CN obtido pelo mapa, e $\lambda = 0,05$) melhorou ligeiramente, os resultados de Q em relação ao M1, com as estatísticas de precisão RMSE, Pbias, e C_{NS} passando de 12,56, -0,87, e -68,77 (referentes a M1), para 11,42, -0,55, -56,51 (M2). Estes resultados nos mostram que apesar da obtenção de um único valor de CN através da tabela do NEH-4 para a estimativa de Q ser questionável, considerar $\lambda = 0,05$ ao invés de 0,2 podem melhorar os resultados.

Os valores de CN para os métodos M3, M4 e M5 foram calculados considerando os valores de Ia separados para cada evento, ou seja, λ foi variável em suas determinações. Com isso, era de se esperar que, dentre os métodos de se estimar os valores de CN com base em eventos observados, os métodos M3, M4 e M5 apresentassem os melhores resultados. Isso foi de fato verificado quando se observa os valores de C_{NS} , sendo de 0,72, 0,40 e 0,68, respectivamente. Contudo, apesar de λ ser variável na determinação do CN, para a estimativa de Q pela equação 6, $\lambda = 0,02$.

Para os métodos M6 a M14, o valor de λ foi fixado em 0,2, ou 0,05 ou 0,02 para a determinação de CN, e os mesmos valores foram atribuídos para a

estimativa de Q . É possível verificar que os métodos M9, M10 e M11, onde foi usado $\lambda = 0,02$, apresentaram os melhores resultados, com valores de C_{NS} de 0,68, 0,67 e 0,67, respectivamente. Para os mesmos métodos, os valores calculados de P_{bias} foram de -10,35, 4,28 e -10,02. Apesar do P_{bias} aceitável para os 3 métodos, o método M10 apresentou a menor tendência, sendo o mais indicado para a estimativa do escoamento superficial direto para a BHRJ, dentre os métodos citados.

Ainda em relação aos métodos foram calculados com base nos eventos chuva-deflúvio, fica visível que considerar um valor de $\lambda = 0,2$ não culmina em bons resultados.

Para a situação na qual não se dispõe de hietogramas e hidrogramas, recomenda-se o uso do parâmetro λ igual a 0,05, visto que a estimativa de Q para a BHRJ apresentou melhores resultados do que para $\lambda = 0,2$. Resultado semelhante foi encontrado por vários autores, Woodward (2003), Shi et al. (2009), Kim et al., (2010), Yuan et al. (2014)), D'Asaro et al. (2014), Ajmal et al. (2015, 2016).

Para a BHRJ, os métodos M12, M13 e M14 utilizaram $\lambda = 0,05$, originando valores de C_{NS} iguais a 0,52, 0,55 e 0,53, respectivamente, ficando visível que os valores de Q são melhores calculados do que com $\lambda = 0,20$, em que os coeficientes C_{NS} foram de -0,18, -0,70 e -0,29 para os mesmos modelos.

Dentre os métodos citados, o mais indicado foi o M13, que leva em consideração a moda entre os valores de CN calculados com $\lambda = 0,05$, pois além de apresentar o maior valor de C_{NS} , evidenciou também os menores valores de RMSE e P_{bias} . O RMSE foi de 6,16 contra 6,34 para M12 e 6,30 para M14, e P_{bias} de -9,28 contra -21,36 para M12 e -18,92 para M14, ou seja, todos os modelos superestimam os valores de Q , conforme pode ser visto nos Gráficos 23, 24 e 25.

Os métodos M3 a M14, baseados nos valores de CN obtidos através dos eventos chuva-deflúvio observados, no geral, melhoraram os resultados da estimativa de Q em relação aos métodos M1 e M2, onde a obtenção do CN foi feita pelo mapa, exceto para M6, M7 e M8, em que a estatísticas aplicadas apresentaram valores similares a M1 e M2. Desta forma, os resultados de RMSE, C_{NS} e Pbias, mostram a importância da calibração dos valores de CN baseados em eventos chuva-deflúvio, que melhoram significativamente a estimativa de Q (HAWKINS et al., 2009; STEWART et al. 2012; AJMAL et al., 2016). Este procedimento fez com que o método CN seja mais adequado para a estimativa do escoamento superficial direto para eventos individuais, apesar de não ser possível essa melhoria em bacias não monitoradas (AJMAL et al., 2015b).

O fato de M1 e M2 não terem sido métodos confiáveis de determinação do CN para a estimativa de Q, indicam que a obtenção do CN pelo mapa não é indicada, contudo, o fato dos métodos M6, M7 e M8 não apresentarem bons resultados estatísticos, indica que $\lambda = 0,2$ não deve ser utilizado na determinação de CN e na estimativa do escoamento superficial direto, mesmo com base em eventos chuva-deflúvio observados.

Em se tratando dos métodos M15 a M20, M15, M16 e M17 dizem respeito à utilização de todos os 166 eventos chuva-deflúvio observados, e os métodos M18, M19 e M20 foram utilizados para a estimativa de Q referente apenas aos 32 eventos com precipitação maiores do que 60 mm, conforme Soulis e Valiantas (2012).

Para ambas as considerações, a estimativa de Q apresentou os melhores resultados quando $\lambda = 0,02$, onde M17 resultou em C_{NS} 0,69 e M20 igual a 0,75. Essa melhora demonstra que estes métodos são mais indicados para maiores precipitações, conforme descrito por Hawkins (1993) e Soulis e Valiantzas (2012). Em seguida, os métodos M16 e M19, em que $\lambda = 0,05$, apresentaram

valores de C_{NS} iguais a 0,67 e 0,70, e por último, os métodos M15 e M18, com $\lambda = 0,2$, os valores de C_{NS} foram de 0,53 e 0,46, respectivamente.

Desta forma, observa-se que para este método, houve uma melhora na estimativa de Q considerando o valor de $\lambda = 0,2$ como foi originalmente proposto, mas ainda assim, para $\lambda = 0,02$ e $0,05$, os resultados foram mais adequados. Ajmal et al. (2016), com base nos valores de RMSE calculados após a estimativa do escoamento superficial direto, encontraram, para $\lambda = 0,2$, resultados significativamente melhores do que a quando se considera a determinação do CN pelo método original, indicando que o modelo proposto por Hawkins (1993), estima de forma adequada, os valores de CN para a estimativa de Q .

Os mesmos autores afirmaram que a eficiência da aplicação do método CN-SCS para a estimativa de Q é superior quando se considera $\lambda = 0,05$, para qualquer método de determinação deste. Ajmal et al. (2016) ainda aplicaram valores de λ iguais a 0,01 e 0 para a estimativa de Q com o valor de CN tabelado, e concluíram que, para as 10 bacias hidrográficas estudadas os valores de P_{bias} ficaram dentro do intervalo de $\pm 10\%$. Não somente o P_{bias} , mas os outros indicadores também mostraram uma melhor eficiência na determinação de Q quando se considera estes valores de λ para o CN tabelado (SCS, 1956, 1964, 1971, 1985, 1993, 2004; HUFFMAN et al., 2011; MELLO; SILVA, 2013).

Os valores de RMSE para os métodos M15 à M20 indicam que os melhores ajustes foram feitos pelos métodos M17 e M20, assim como quando se avalia os valores de C_{NS} . Contudo, considerando os valores de P_{bias} , o M17 foi o que apresentou o maior valor, dentre os métodos que estimaram Q considerando todos os dados. Seu valor foi de 15,25 para M17, -4,62 e 4,60% para M15 e M16, respectivamente.

Para M18, M19 e M20, o Pbias comportou-se seguindo os valores de RMSE e C_{NS} , sendo de: -36,59%, -18,50%, e 0,46%, demonstrando que M20 apresentou um desempenho muito bom, M18 um desempenho ruim, e M19 um resultado satisfatório (MORIASI et al, 2007).

Ajmal et al. (2016) aplicaram seis métodos para determinação dos valores de CN para 10 bacias hidrográficas localizadas na Coréia do Sul. A mesma metodologia descrita por Hawkins (1993) foi aplicada, porém, com os dados de vazão e escoamento não ordenados. Apesar dos baixos coeficientes de determinação (R^2), o resultado dos valores de Q estimados foram melhores do que quando se considera o CN tabelado. Em seu estudo, a maioria das bacias (8 em 10) apresentaram o comportamento padrão (*standard behaviour*) assim como a BHRJ, valores consistentes com aqueles estimados por Hawkins (1993) e D'Asaro et al. (2014).

Considerando agora os métodos M21 a M26, estes foram aplicados com o CN determinado pelo modelo denominado *Two CN Model*, sendo M21, M22 e M23 aplicados a todos os 166 eventos, e os métodos M24, M25 e M26 apenas aos eventos de precipitação maiores do que 60 mm, conforme sugerido por Soulis e Valiantzas (2012).

Os maiores valores de C_{NS} , iguais a 0,68 e 0,73 foram para os métodos M22 e M25, ou seja, para $\lambda = 0,05$. Para M23 e M26 ($\lambda = 0,02$), os valores de C_{NS} foram iguais a 0,68 e 0,72, ou seja, com uma diferença mínima em relação aos anteriores. E, mesmo com esse novo método para determinação de CN, quando $\lambda = 0,2$, os resultados também não foram comparáveis em relação aos anteriores, com os valores de C_{NS} iguais a 0,51 para M21 e 0,41 para M24.

Os valores de RMSE reforçam os valores de C_{NS} obtidos, indicando que M22 e M25 foram mais eficientes na estimativa de Q, entretanto, Pbias para M21 ($\lambda = 0,2$) foi mais próximo de zero (igual a -6,68 %) do que para M23 (igual a 19,19 %).

Os últimos três métodos foram aqueles em que os resultados foram similares independentemente do valor de λ considerado. Os coeficientes de Nash e Sutcliffe (C_{NS}) foram de 0,67; 0,69; e 0,67 para M27, M28 e M29, respectivamente. Os valores de RMSE foram iguais a 5,26 para M27 e M29 e 5,12 para M28, e Pbias igual a 1,0, 7,46 e 20,29 %. Essa pequena variação de C_{NS} ocorre porque este modelo considera 11 diferentes valores de CN para a estimativa de Q. Com isso, devido ao alto grau de liberdade, este modelo ajusta com precisão os valores de CN para uma determinada área de abrangência do valor calibrado.

Soulis e Valiantzas (2013) avaliaram a correlação existente entre a variação dos valores de CN observados com o aumento da precipitação a fim de avaliarem a distribuição espacial dos valores de CN levando em consideração a heterogeneidade da bacia. Seus estudos foram conduzidos em uma bacia de 15,2 Km² localizada na Grécia, escolhida por apresentar um comportamento complacente (*complacent behaviour*) de acordo com a classificação de Hawkins (1993), e o valor de λ considerado foi igual a 0,2.

Assim como para a BHRJ, os valores de CN ajustados através dos dados de precipitação e escoamento superficial direto ordenados de forma crescente e independente foram utilizados os dados originais (sem ordenação) para demonstrar que o modelo proposto fornece previsões adequadas para a estimativa de Q, conforme pode ser verificado no Gráfico 43.

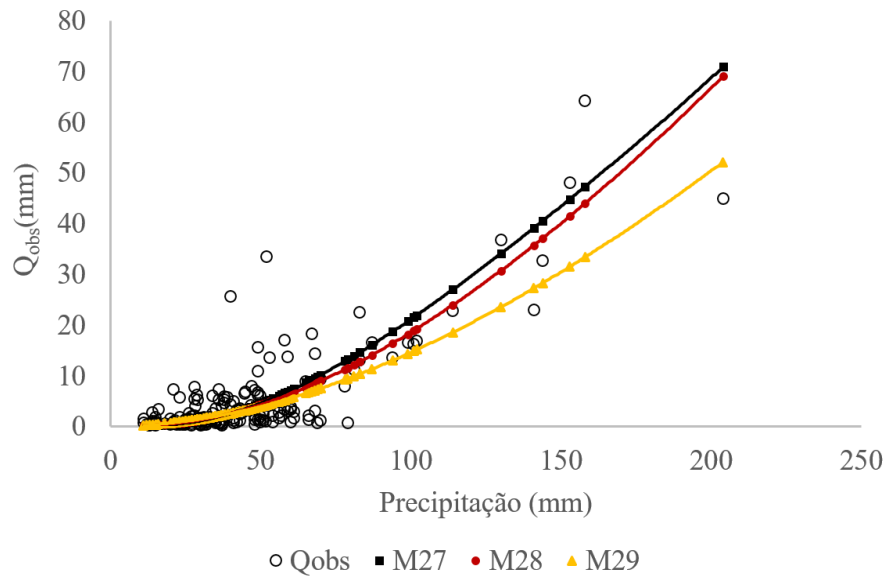


Gráfico 43 Modelo heterogêneo de determinação do CN aplicado à BHRJ para 3 valores de λ

Conforme Soulis e Valiantzas (2012), esta metodologia apresentou ótimos resultados para $\lambda = 0,2$, com baixo valor de RMSE, sendo igual a 5,26 mm para a BHRJ, e um Pbias de apenas 1%. Para $\lambda = 0,02$, verifica-se que, mesmo com coeficiente de determinação alto ($R^2 = 0,97$), após a utilização dos valores de CN obtidos para a estimativa de Q utilizando os dados originais (não ordenados), verifica-se que há uma subestimativa nos valores de Q, resultado este visível devido ao alto Pbias.

É fato que dentre todos os métodos, o único que apresentou melhores resultados para $\lambda=0,2$, com Pbias mais adequado do que para $\lambda = 0,02$, foi o que considera o modelo heterogêneo para a determinação de CN, contudo, os coeficientes C_{NS} e RMSE foram exatamente iguais. Assim, fazendo-se uma análise mais criteriosa dos dados, verifica-se que para menores precipitações, $\lambda = 0,02$ apresentou melhores resultados do que para $\lambda = 0,2$, mas, à medida que a precipitação aumenta, a curva do M27 ($\lambda = 0,2$) sobe mais rapidamente do que para M29 ($\lambda = 0,02$), ocasionando em subestimativa dos dados.

Esse fato foi verificado por Hjmfelt (2001), que achou adequado a consideração de dois ou mais valores de λ , sendo estes dependentes da precipitação. Woodward et al. (2003), verificaram que considerar menores valores λ para bacias com menores valores de CN resulta em melhor aproximação de Q, uma vez que menores valores de CN correspondem a solos, cobertura vegetal e manejo que favorecem a infiltração, aumentando assim o valor de S, e, fixando a abstração inicial, quanto maior o S, menor o valor de λ . Além disso, baixos valores de CN também correspondem a altos valores de Ia.

Para os métodos em questão, as baixas precipitações que geraram valores de escoamento superficial direto são devido às regiões da bacia com altos valores de CN, tornando mais fácil fazer esse tipo de consideração do que utilizar diferentes valores de λ para uma mesma bacia. Assim, quando se considera a heterogeneidade da bacia, os baixos valores de precipitação que geram escoamento superficial direto, estão vinculados a áreas impermeáveis tais como: rodovias, áreas urbanas, corpos d'água etc. (SOULIS; VALIANTZAS, 2012). À medida que a precipitação aumenta, outras áreas com menores valores de CN começam a contribuir para o aumento de Q. A proposta deste modelo heterogêneo, aplicado em M27, M28 e M29 para a BHRJ, está em conformidade com as características naturais da bacia hidrográfica e justificam, portanto, a alta variação dos valores de CN observados (SOULIS; VALIANTZAS, 2012).

Soulis e Valiantzas (2012), também consideraram um único valor de CN obtido pelo mapa e obtiveram resultados similares aos observados na BHRJ, ou seja, a estimativa de Q considerando apenas um único valor de CN médio e fixo não é satisfatória.

Os Gráficos 44, 45 e 46 dizem respeito aos valores de CN calculados para $\lambda = 0,02, 0,05$ e $0,2$, que foram apresentados na Tabela 18.

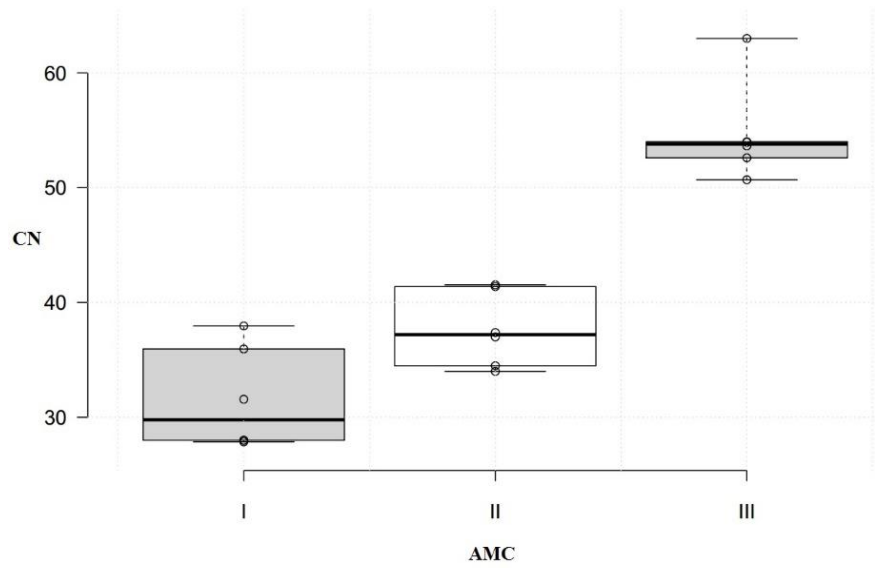


Gráfico 44 Variação dos valores de CN obtidos pelos métodos M3, M4, M5, M9, M10 e M11 para $\lambda = 0,02$

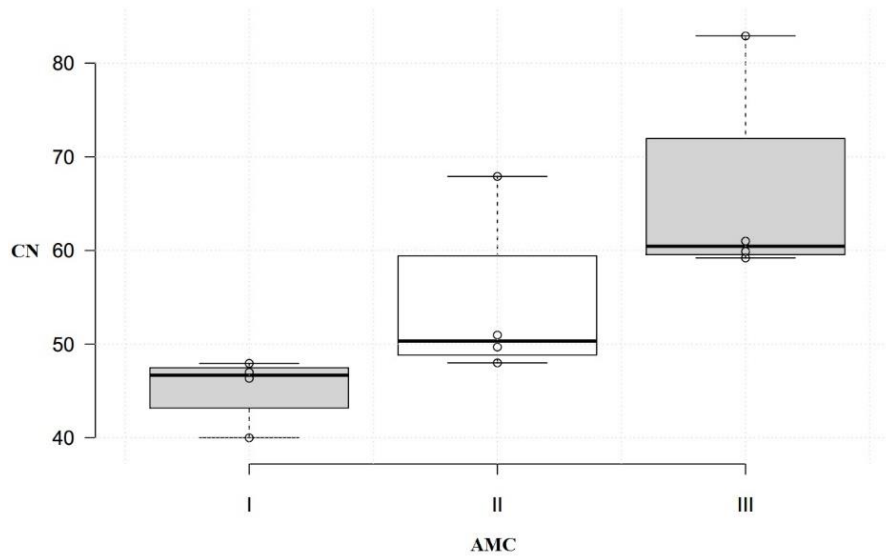


Gráfico 45 Variação dos valores de CN obtidos pelos métodos M2, M12, M13 e M14 para $\lambda = 0,05$

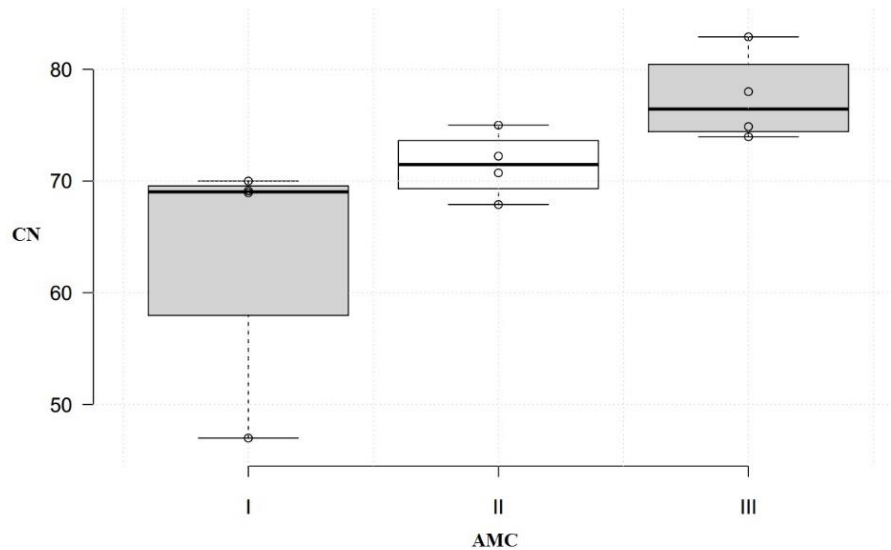


Gráfico 46 Variação dos valores de CN obtidos pelos métodos M1, M6, M7 e M8 para $\lambda = 0,2$

Para $\lambda = 0,02$, observa-se pelo Gráfico 44, que não houve grandes variações dos valores determinados de CN para AMC I, sendo que a média para os 6 métodos (M3, M4, M5, M9, M10 e M11) foi igual a 31,56, o maior valor foi de 37,96 (M9), e o menor valor de 27,86 para M5. Para AMC II também não houve grandes variações dos valores entre os métodos, com uma média de 37,63, máximo de 41,54 (M11), e mínimo de 34 (M4). Observa-se, porém, que para AMC III, a média dos valores de CN para os 6 métodos considerados foi de 54,65, mínimo de 50,69 (M3), e máximo de 63 (M4). Este resultado, juntamente com os valores de C_{NS} , P_{bias} e RMSE apresentados na Tabela 18, demonstra que considerar um valor de CN igual a 63 na aplicação do método CN-SCS para $\lambda = 0,02$, pode ocasionar erros significativos na estimativa de Q.

Para $\lambda = 0,05$, de acordo com o Gráfico 45, observa-se que houve uma maior variação dos valores de CN para as condições II e III de umidade

antecedente, com valores médios de 54,14 e 65,75, mínimos de 48,00 (M13), e 59,20 (M12), e máximos de 67,90 (M2) e 82,90 (M2).

Verifica-se, portanto, que M2 apresentou valores superiores aos valores médios para as condições II e III de umidade, mostrando-se necessário rever uma adequação destes. Pode-se afirmar então, que a obtenção do CN mapeado para AMC I e $\lambda = 0,05$ mostrou ser uma boa aproximação na estimativa de Q para a BHRJ.

Fato contrário ocorreu quando $\lambda = 0,2$ foi aplicado, em que para as condições de AMC II e III, o valor de CN mapeado se aproximou dos valores médios obtidos e para AMC I, o valor mapeado foi significativamente inferior.

Observa-se na Tabela 18 e Gráfico 46 que a média dos valores de CN para AMC I foi de 63,77, enquanto o valor máximo foi igual a 70 (M7) e mínimo de 47 (M1). Para AMC II, o método M1 também apresentou o menor CN, igual a 67,90, e M7 o maior, igual a 75. Ajmal et al. (2015), considerando $\lambda = 0,2$, encontraram resultados semelhantes, sendo que os valores de CN calculados com base em eventos chuva-deflúvio foram superiores aos valores obtidos pela tabela do NEH-4, chegando a conclusão de que os resultados foram insatisfatórios aos obtidos na estimativa de Q, considerando o CN mapeado devido a essa subestimativa do parâmetro. Entretanto, Ajmal et al. (2015) não consideraram as condições de umidade antecedente, assim como foi feito neste estudo para a BHRJ.

Portanto, esses baixos valores de RMSE, CNS, e Pbias apresentados para M1 e M2, estão diretamente vinculados aos valores de CN considerados, em que para $\lambda = 0,05$, os valores de CN para AMC II e III foram superestimados, e para $\lambda = 0,2$, o valor de CN foi subestimado para AMC I.

Os resultados obtidos para a BHRJ foram consistentes com aqueles relatados por muitos pesquisadores, tais como, Mishra et al. (2004), Garen e Moore (2005), Baltas et al. (2007), Shi et al. (2009) e D'Asaro et al. (2014). A

consideração de valores de λ inferiores a 0,2 está de acordo com os estudos de D'Asaro et al. (2014), onde 75% destes foram próximos de zero para os dados não ordenados, e menores do que 0,11 para os dados chuva-deflúvio ordenados. Da mesma forma, valores de λ menores do que 0,20 foram obtidos por Mishra et al. (2004).

6 CONCLUSÕES

A aplicação de um único valor de CN para a estimativa do escoamento superficial direto obteve resultados minimamente aceitáveis, com uma pequena melhora quando $\lambda = 0,05$ foi aplicado.

Um valor de CN apropriado é fundamental para uma estimativa confiável do escoamento superficial direto, mas, suposições originalmente feitas para algumas condições hidrológicas podem não reproduzir resultados realistas de escoamento.

Para a BRHJ, o método mais adequado para a estimativa de Q considerando qualquer magnitude de precipitação foi o método M3. Contudo, sua aplicação necessita de valores da abstração inicial separados para cada evento chuva-deflúvio, o que de certa forma, limita a aplicação do mesmo.

É possível observar que para os métodos baseados em eventos chuva-deflúvio separados, os valores da moda, média e mediana de CN foram aproximadamente o mesmo, sugerindo, portanto, que este parâmetro apresente um comportamento típico de distribuição normal. Dentre estes métodos, observou-se que aqueles em que $\lambda = 0,02$ (M9, M10 e M11) apresentaram melhores resultados que $\lambda = 0,05$ e $\lambda = 0,2$, respectivamente.

Os métodos M15, M16 e M17, baseados na determinação assintótica, também apresentaram bons resultados para a estimativa de Q, com uma melhora significativa do resultado na consideração de $\lambda = 0,2$. Sua aplicação é ainda mais indicada para eventos de precipitação com maiores magnitudes.

O único método que considera $\lambda = 0,2$, e que apresentou melhores resultados na estimativa de Q do que para $\lambda = 0,02$, e $\lambda = 0,05$, foi o método baseado no modelo heterogêneo (M27).

Para a BHRJ, recomenda-se o método M27 para $\lambda = 0,2$.

REFERÊNCIAS

AJMAL, M. et al. Improved runoff estimation using event-based rainfall-runoff models. **Water Resources Management**, v. 29, n. 6, p. 1995-2010, 2015.

_____. Investigation of SCS-CN and its inspired modified models for runoff estimation in South Korean watersheds. **Journal of Hydro-environment Research**, v. 9, n. 4, p. 592-603, 2015.

_____. Improved runoff estimation using event-based rainfall-runoff models. **Water Resources Management**, v. 29, n. 6, p. 1995-2010, 2015.

AJMAL, M.; KIM, Tae-Woong. Quantifying excess stormwater using SCS-CN-based rainfall runoff models and different curve number determination methods. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 141, n. 3, p. 04014058, 2014.

ALFIERI, L. et al. Evaluation of ensemble streamflow predictions in Europe. **Journal of Hydrology**, v. 517, p. 913-922, 2014.

ANDRADE, M. A. **Simulação Hidrológica numa bacia hidrográfica representativa dos Latossolos na região Alto Rio Grande**. 2011. 102 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2011.

ANDRADE, M.A.; MELLO, C. R. de; BESKOW, S. Simulação hidrológica em uma bacia hidrográfica representativa dos Latossolos na região Alto Rio Grande, MG. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 1, p. 69-76, 2013.

ARAÚJO, A. R. **Levantamento de solos na bacia do Alto Rio Grande**. 2006. 268 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2006.

BALTAS, E. A.; DERVOS, N. A.; MIMIKOU, M. A. Technical Note: Determination of the SCS initial abstraction ratio in an experimental watershed in Greece. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 11, n. 6, p. 1825-1829, 2007.

BESKOW, S. **LASH model**: a hydrological simulation tool in GIS framework. 2009. 118p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2009.

BONTA, J. V. Curve Number Method Response to Historical Climate Variability and Trends. **Transactions of the ASABE**, v. 58, n. 2, p. 319-334, 2015.

BRASIL. Agência Nacional de Águas. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil**. Brasília, 2015. 87 p.

CARSON, R. **Primavera silenciosa**. MARTINS, C. S. A. (Trad.). 1. ed. São Paulo: Gaia, 2010.

CASTANY, G. **Traité pretique des eaux souterraines**. 2. ed. Paris: Dunod, 1967. 661 p.

CASTRO, P. S.; LOPES, J. D. S. **Recuperação e conservação de nascentes**. Viçosa: CPT, 2001. 84p. (Série Saneamento e Meio - Ambiente, n. 296).

D'ASARO, F.; GRILLONE, G.; HAWKINS, R. H. Curve Number: Empirical evaluation and comparison with Curve Number handbook tables in Sicily. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 19, n. 12, p. 04014035, 2014.

D'ASARO, F.; GRILLONE, G. Empirical investigation of curve number method parameters in the Mediterranean area. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 17, n. 10, p. 1141-1152, 2012.

DESHMUKH, D. S. et al. Estimation and comparison of curve numbers based on dynamic land use land cover change, observed rainfall-runoff data and land slope. **Journal of hydrology**, v. 492, p. 89-101, 2013.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Centro Nacional de Pesquisa de Solos: Rio de Janeiro, 2013.

ENDALE, D. M. et al. Curve Numbers from Conventional and No-Till Cropping: A 39-Year Dataset from a Small Georgia Piedmont Watershed. **Transactions of the ASABE**, v. 58, n. 2, p. 379-391, 2015.

ESPÍRITO SANTO, C. M.; BRAGA, B.; LOBO, G. A.; FORTI, M. C.; MELFI, A. J. Simulação hidrológica de pequena bacia na Amazônia Tropical. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 6, n. 2, p. 107-118, abr./jun. 2001.

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, 2005.

GETTER, K. L.; ROWE, D. B.; ANDRESEN, J. A. Quantifying the effect of slope on extensive green roof stormwater retention. **Ecological engineering**, v. 31, n. 4, p. 225-231, 2007.

GONÇALVES, T. D. **Geoprocessamento como ferramenta de apoio à gestão dos recursos hídricos subterrâneos do Distrito Federal**. 2007, 88 p. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Universidade de Brasília – Instituto de Geociências, Brasília, DF, 2007.

GROVE, M.; HARBOR, J.; ENGEL, B. Composite vs. Distributed curve numbers: effects on estimates of storm runoff depths. **Journal of the American Water Resource Association**, Middleburg, v. 34, n. 5, p. 1015-1023, out. 1998.

GRUNWALD, S.; NORTON, L. D. Calibration and validation of a non-point source pollution model. **Agricultural Water Management**, v. 45, n. 1, p. 17-39, 2000.

HAWKINS, R. H.; HJELMFELT JR, A.T.; ZEVENBERGEN, A. W. R. probability, storm depth, and curve numbers. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 111, n. 4, p. 330-340, 1985.

HAWKINS, R. H. Asymptotic determination of runoff curve numbers from data. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 119, n. 2, p. 334-345, 1993.

HAWKINS, R. H.; WARD, T. J.; WOODWARD DE, V. M. JA Curve number hydrology-state of practice. **The ASCE/EWRI publication**, v. 6, 2009.

HJELMFELT, A. T. et al. Curve numbers, recent developments. In: IAHR Congress Proceedings, 29., **Anais...**Beijing, China. 2001.

HUFFMAN, R. L.; et al. **Soil and water conservation engineering**. 6th Edition. St. Joseph: ASABE, 2011. 523 p.

JACOBS, J. H.; SRINIVASAN, R. Effects of curve number modification on runoff estimation using WSR-88D rainfall data in Texas watersheds. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 60, n. 5, p. 274-279, 2005.

JAIN, M. K.; MISHRA, S. K., SURESH, B. P.; VENUGOPAL, K On the Ia-S relation of the SCS-CN model. **Nord Hydrol**, v. 37, n, 3, p. 261-275, 2006b.

JAIN, M. K.; MISHRA, S. K.; SINGH, V. P Evaluation of AMC dependent SCS-CN-based models using watershed characteristics. **Water Resour Manag**, v. 204, n. 4, p. 531-552, 2006a.

JEON, J. H.; LIM, K. J.; ENGEL, B. A. Regional calibration of SCS-CN L-THIA model: application for ungauged basins. **Water**, v. 6, n. 5, p. 1339-1359, 2014.

KHALEGHI, M. R. et al. Efficiency of the geomorphologic instantaneous unit hydrograph method in flood hydrograph simulation. **Catena**, v. 87, n. 2, p. 163-171, 2011.

KIM, N. W.; LEE, J.. Temporally weighted average curve number method for daily runoff simulation. **Hydrological Processes**, v. 22, n. 25, p. 4936-4948, 2008.

KIM, N. W. et al. SWAT application to estimate design runoff curve number for South Korean conditions. **Hydrological processes**, v. 24, n. 15, p. 2156-2170, 2010.

KING, K. W.; BALOGH, J. C. Curve numbers for golf course watersheds. **Transactions of the ASABE**, v. 51, n. 3, p. 987-996, 2008.

LOMBARDI-NETO, F.; BELLINAZZI JÚNIOR, R.; GALETI, P. A.; BERTOLINI, D.; LEPSCH, I. F.; OLIVEIRA, J. B. **Nova abordagem para o cálculo de espaçamento entre terraços**. In: SIMPÓSIO SOBRE TERRACEAMENTO AGRÍCOLA. Campinas, 1989. Fundação Cargill. p. 99-124.

MACHADO, R. R. **Simulação de escoamento superficial e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento**. 2002. 152 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, SP, 2002,

MCCUEN, R. H. **Hydrologic Analysis and Design**. New Jersey: Prentice Hall, 1989. 867 p.

_____. Approach to confidence interval estimation for curve numbers. **Journal of Hydrology Engineering – ASCE**, v. 7, n. 1, p. 43–48. 2002.

MELO NETO, J. de O. **Análise de sensibilidade escalar do modelo hidrológico SWAT**. 2012. Dissertação (Mestrado em Sistemas Agrícolas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG, 2012.

MICHEL, C.; ANDRÉ, A V.; PERRIN, C. Soil conservation service curve number method: How to mend a wrong soil moisture accounting procedure?. **Water Resources Research**, v. 41, n. 2, 2005.

MELLO, C. R. D.; SILVA, A. M. D. **Hidrologia: princípios e aplicações em sistemas agrícolas**. 1. ed. Lavras: UFLA, 2013. 455 p.

MELLO, C. R. D. de et al. Abstração inicial da precipitação em microbacia hidrográfica com escoamento efêmero. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 2003.

_____. Development and application of a simple hydrologic model simulation for a Brazilian headwater basin. **Catena**, v. 75, n. 3, p. 235-247, 2008.

MILIANI, F.; RAVAZZANI, G.; MANCINI, M.. Adaptation of precipitation index for the estimation of antecedent moisture condition in large mountainous basins. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 16, n. 3, p. 218-227, 2010.

MISHRA, S. K.; SINGH, V. P. Another look at SCS-CN method. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 4, n. 3, p. 257-264, 1999.

_____. **Soil Conservation Service Curve Number (SCS-CN) Methodology** 'Kluwer' Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands. ISBN 1-4020-1132-6, 2003.

_____. Evaluation of the SCS-CN-based model incorporating antecedent moisture. **Water resources management**, v. 18, n. 6, p. 567-589, 2004.

MISHRA, S. K. et al. Catchment area-based evaluation of the AMC-dependent SCS-CN-based rainfall–runoff models. **Hydrological processes**, v. 19, n. 14, p. 2701-2718, 2005.

MISHRA, S. K.; SINGH, V. P. A relook at NEH-4 curve number data and antecedent moisture condition criteria. **Hydrological processes**, v. 20, n. 13, p. 2755-2768, 2006.

MISHRA, S. K. et al. A rain duration and modified AMC-dependent SCS-CN procedure for long duration rainfall-runoff events. **Water resources management**, v. 22, n. 7, p. 861-876, 2008.

MOODY, J. A. et al. Current research issues related to post-wildfire runoff and erosion processes. **Earth-Science Reviews**, v. 122, p. 10-37, 2013.

MORIASI, D. N. et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **Transactions of the ASABE**, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models part I — A discussion of principles. **Journal of hydrology**, v. 10, n. 3, p. 282-290, 1970.

NUNES, G. S. **Aplicabilidade de modelos de hidrograma unitário em bacias hidrográficas hidrologicamente distintas**. 2015. 190 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) – Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Centro de Desenvolvimento Tecnológico, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, RS, 2015.

OLIVEIRA, P. T. S. et al. Curve number estimation from Brazilian Cerrado rainfall and runoff data. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 71, n. 5, p. 420-429, 2016.

PAPPAS, E. A. et al. Impervious surface impacts to runoff and sediment discharge under laboratory rainfall simulation. **Catena**, v. 72, n. 1, p. 146-152, 2008.

PINTO, N. L. de S.; HOLTZ, A. C. T.; MARTINS, J. A. Hidrologia básica. In: **Hidrologia básica**. Edgard Blucher, 1976.

PONCE, V. M.; HAWKINS, R. H. Runoff curve number: Has it reached maturity? **Journal of hydrologic engineering**, v. 1, n. 1, p. 11-19, 1996.

RODRIGUES, M. T.; RODRIGUES, B. T.; CAMPOS, S. Desempenho da classificação supervisionada em diferentes sistemas de informação geográfica. **Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v. 11, n. 5, 2015.

ROTHER, F.; DEWES, T.; SCHNEIDER, M.. Coleta da água da chuva: um meio sustentável e eficaz. **Revista Infinity**, n. 1, 2016.

SAHU, R. K.; MISHRA, S. K.; ELDHO, T. I. Comparative evaluation of SCS-CN-inspired models in applications to classified datasets. **Agricultural water management**, v. 97, n. 5, p. 749-756, 2010.

SARTORI, A. **Avaliação da classificação hidrológica do solo para a determinação do excesso de chuva do método do serviço de conservação do solo dos Estados Unidos**. 2004. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, SP, 2004.

SCS. **National engineering handbook, Section 4: Hydrology, Soil Conservation Service**. USDA, Washington, DC. 1956, 1964, 1971, 1985, 1993, 2004.

SHI, Z. H. et al. Research on the SCS-CN initial abstraction ratio using rainfall-runoff event analysis in the Three Gorges Area, China. **Catena**, v. 77, n. 1, p. 1-7, 2009.

SOIL CONSERVATION SERVICE (SCS). **Hydrology for small watersheds**. Technical Release 55. Springfield: United States Department of Agriculture, 1986.

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, J. B. de. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília: Embrapa, 2013. 353 p.

SETTI, A. A. et al. **Introdução ao gerenciamento de recursos hídricos**. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica, 2001.

SETZER, J.; PORTO, R.L. L. Tentativa de avaliação do escoamento superficial de acordo com o solo e seu recobrimento vegetal nas condições do Estado de São Paulo. **Boletim Técnico DAEE**, v. 2, n. 2, p. 81-104, 1979.

SHEEDER, S. A.; ROSS, J. D.; CARLSON, T. N. Dual urban and rural hydrograph signals in three small watersheds. **Journal of American Water Resources Association**, Middleburg, v. 38, n. 4, p. 1027-1040, aug. 2002.

SHI, Z. H. et al. Research on the SCS-CN initial abstraction ratio using rainfall-runoff event analysis in the Three Gorges Area, China. **Catena**, v. 77, n. 1, p. 1-7, 2009.

SILVA, A. M.; MELLO, C. R. **Pesquisa sobre as interações entre o regime pluvial e o regime de escoamento das sub-bacias de drenagem para o reservatório da UHE de Camargos/CEMIG**. 2011. 350 p. Relatório Final de Atividades do Projeto P&D 176. No prelo.

SILVA, J. A. M. da et al. Vazões mínimas e de referência para outorga na região do Alto Rio Grande, Minas Gerais. **R. Bras. Eng. Agríc. Ambiental**, v. 10, n. 2, p. 374-380, 2006.

_____. Modelo para a obtenção do hidrograma de escoamento superficial em bacias hidrográficas. Desenvolvimento e análise de sensibilidade. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 4, n. 1, p. 78-84, 2009.

SILVA, A. M.; MELLO, C. R. de; CORREA, M. R. **Estudos hidrológicos sobre o regime de escoamento das bacias de drenagem do Alto Rio Grande à montante do reservatório da UHECamargos/CEMIG**. Lavras: UFLA; Belo Horizonte: CEMIG/ANEEL, 2004. 90 p. (Relatório Parcial do Projeto de P&D 076, CEMIG/ANEEL).

SILVEIRA, A. da. Ciclo hidrológico e bacia hidrográfica. **Hidrologia: ciência e aplicação**. São Paulo: EDUSP, p. 35-51, 2001.

SILVEIRA, L.; CHARBONNIER, F.; GENTA, J. L. The antecedent soil moisture condition of the curve number procedure. **Hydrological Sciences Journal**, v. 45, n. 1, p. 3-12, 2000.

SOULIS K. X., VALIANTZAS JD, DERCAS N, LONDRA PA. Analysis of the runoff generation mechanism for the investigation of the SCS-CN method applicability to a partial area experimental watershed. **Hydrology Earth System Science** 13:605–615. 2009.

SOULIS, K. X. et al. Investigation of the direct runoff generation mechanism for the analysis of the SCS-CN method applicability to a partial area experimental watershed. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 13, n. 5, p. 605-615, 2009.

SOULIS, K. X.; VALIANTZAS, J. D. Variation of runoff curve number with rainfall in heterogeneous watersheds. The Two-CN system approach. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 16, n. 3, p. 1001-1015, 2012.

_____. Identification of the SCS-CN parameter spatial distribution using rainfall-runoff data in heterogeneous watersheds. **Water resources management**, v. 27, n. 6, p. 1737-1749, 2013.

STEENHUIS, T. S. et al. SCS runoff equation revisited for variable-source runoff areas. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 121, n. 3, p. 234-238, 1995.

STEWART, D.; CANFIELD, E.; HAWKINS, R. Curve Number determination methods and uncertainty in hydrologic soil groups from semiarid watershed data. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 17, n. 11, p. 1180-1187, 2011.

TESSEMA, S. M. et al. Effects of different retention parameter estimation methods on the prediction of surface runoff using the SCS curve number method. **Water resources management**, v. 28, n. 10, p. 3241-3254, 2014.

TRAMBLAY, Y. et al. Assessment of initial soil moisture conditions for event-based rainfall-runoff modelling. **Journal of Hydrology**, v. 387, n. 3, p. 176-187, 2010.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. 2. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2005. 678 p.

TUCCI, C. E. M.; BELTRAME, L. F. S. Evaporação e Evapotranspiração. In: TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 4. ed. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2004. cap. 2, p. 253-287.

USBR U.S. Bureau of Reclamation - United States Department of the interior. **Design of Small Dams**. Companhia Editorial S.A. México, D. F. 1977. 639 p.

USDA SCS (2004) 'Hydrology' National Engineering Handbook, Supplement A, Section 4, Soil Conservation Service, USDA, Washington, D.C.
WALEGA, Andrzej et al. Comparison of SCS-CN determination methodologies in a heterogeneous catchment. **Journal of Mountain Science**, v. 12, n. 5, p. 1084-1094, 2015.

WILKEN, P. S. **Engenharia de Drenagem Superficial**. São Paulo, Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB), 1978. 478 p.

WOODWARD, D. E. et al. Runoff curve number method: examination of the initial abstraction ratio. In: **World Water & Environmental Resources Congress 2003**, Asce, 2003. p. 1-10.

WWAP (United Nations World Water Assessment Programme). 2016. The United Nations World Water Development Report 2016: Water and Jobs. Paris, UNESCO.

YUAN, Y. et al. Initial abstraction and curve numbers for semiarid watersheds in Southeastern Arizona. **Hydrological Processes**, v. 28, n. 3, p. 774-783, 2014.