



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**GLÁUBER PONTES RODRIGUES**

**INCERTEZAS EM MODELOS HIDROLÓGICOS:**  
**O CASO DO MODELO SCS/CN APLICADO À BACIA EXPERIMENTAL DE**  
**AIUABA**

**FORTALEZA**

**2019**

GLÁUBER PONTES RODRIGUES

INCERTEZAS EM MODELOS HIDROLÓGICOS:  
O CASO DO MODELO SCS/CN APLICADO À BACIA EXPERIMENTAL DE AIUABA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola do Centro de Ciência Agrárias, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola. Área de Concentração: Manejo e Conservação de Bacias Hidrográficas no Semiárido.

Orientador: Prof. Dr. José Carlos de Araújo.

FORTALEZA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- R613i Rodrigues, Gláuber Pontes.  
Incertezas em modelos hidrológicos : o caso do modelo SCS/CN aplicado à Bacia Experimental de Aiuaba / Gláuber Pontes Rodrigues. – 2019.  
77 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Fortaleza, 2019.  
Orientação: Prof. Dr. José Carlos de Araújo.
1. Hidrologia estocástica. 2. Regiões semiáridas. 3. Análise de incertezas. 4. Simulação de Monte Carlo. I. Título.

CDD 630

---

GLÁUBER PONTES RODRIGUES

INCERTEZAS EM MODELOS HIDROLÓGICOS:  
O CASO DO MODELO SCS/CN APLICADO À BACIA EXPERIMENTAL DE AIUABA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola do Centro de Ciência Agrárias, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola. Área de Concentração: Manejo e Conservação de Bacias Hidrográficas no Semiárido.

Aprovada em: 08/02/2019.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. José Carlos de Araújo (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. George Leite Mamede (Avaliador)  
Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)

---

Prof. Dr. José Wellington Batista Lopes (Avaliador)  
Universidade Federal do Piauí (UFPI)

---

Prof. Dr. José Carlos Parente de Oliveira (Avaliador)  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE)

À Tereza e Bárbara.

À minha avó Conceição e ao meu tio Luís  
Carlos.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pela proteção em todos os caminhos.

À minha mãe Tereza, minha irmã Bárbara e minha companheira Juliana, por depositarem fé e amor imenso em mim, sobretudo nos momentos onde falhei ou me fiz ausente; que vibraram com cada conquista minha e não me deixaram esmorecer com os tropeços.

À minha avó Conceição, uma das mulheres mais fortes que já conheci; que lutou a vida inteira para que seus filhos tivessem acesso à educação e dignidade.

Aos tios e às tias pelo fundamental apoio desde o momento em que ingressei na Universidade, contribuindo para que nela eu permanecesse.

Ao professor José Carlos de Araújo pela atenção, paciência e sabedoria; por sempre me atender com cordialidade sem fim, inspirando-me e enriquecendo meus conhecimentos a cada conversa.

Aos membros da banca, professores George Mamede, José Parente e José Wellington, por aceitarem prontamente o convite e pelas contribuições a este trabalho.

Aos amigos e amigas do PPGEA: Suziane, por toda a paciência e confiança em mim; a Álisson, Erich, Jairo, Ítalo e Thales, pelo companheirismo e pelos essenciais momentos de descontração; a Márcio Régys, por ser um raro exemplo de bondade e inteligência; à Kenya e Emanuel pela frequente disposição em ajudar; à Gabriela, Pedro, Antônio Viana, Paulilo e Thayslan, por se envolverem em discussões fundamentais da pesquisa.

Aos professores e professoras do Departamento de Engenharia Agrícola, em especial ao professor Carlos Alexandre, que não esteve presente na banca como avaliador desta dissertação, mas contribuiu na qualificação e participou de todos os momentos do mestrado, como Coordenador e amigo, sendo excelente em ambas as funções.

A José Vidal por gentilmente ceder muitos dos dados da Bacia Experimental de Aiuaba, fundamentais para este trabalho.

Aos funcionários e às funcionárias do Departamento de Engenharia Agrícola, por propiciarem um ambiente de trabalho e estudos digno.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro com a manutenção da bolsa de auxílio.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

*“Em nossa época, o cientista precisa tomar consciência da utilidade social e do destino prático reservado a suas descobertas.”*

Florestan Fernandes (1920-1995)

*“A maior chuva ainda está por vir.”*

Frase atribuída a Leonardo da Vinci (1452-1519)

## RESUMO

A maioria dos processos hidrológicos que ocorrem em uma bacia hidrográfica são, em certa medida, aleatórios. Da mesma forma, também são os impactos previstos. Muitas vezes os parâmetros dos modelos utilizados para prever os múltiplos impactos (hidrológicos, econômicos, ambientais e sociais) também são incertos. Portanto, ignorar esta incerteza é ignorar a realidade. Ante isto, esta investigação teve como objetivos (i) quantificar as incertezas dos parâmetros  $\lambda$  e CN do modelo SCS/CN, quando aplicado a uma bacia experimental localizada em região semiárida de Caatinga preservada (10 anos de dados de precipitação e escoamento, 2005-2014) e (ii) propor um método de avaliação de desempenho de modelos hidrológicos. Foi evidenciado um comportamento bimodal nos histogramas de respostas dos dois parâmetros. Isto evidencia que tanto CN quanto  $\lambda$  variam também por efeito das condições de macroporosidade do solo provocada pela dinâmica das raízes na Caatinga devido à alternância entre período de estio e período chuvoso. Estes elementos alteram substancialmente as abstrações iniciais e ratificam a hipótese de que o CN é variável de evento a evento. Provou-se, portanto, que as abstrações iniciais, influenciadas pela dinâmica das raízes no solo, contribuem significativamente para as incertezas na modelagem hidrológica desta bacia. A proposta de análise de incertezas do modelo hidrológico aqui desenvolvida mostrou-se adequada aos objetivos do estudo e, contanto sejam conhecidas algumas informações estatísticas fundamentais das variáveis, como a função densidade de probabilidade, pode ser reproduzida satisfatoriamente com diferentes modelos e regiões. As simulações baseadas no Método de Monte Carlo acertaram de 5 a 10% das previsões. Este número não é satisfatório e as justificativas residem na simplicidade do modelo SCS/CN e nas incertezas naturais dos processos hidrológicos. Devido ao uso amplo do SCS/CN, sugere-se que sua aplicação seja sempre associada a uma abordagem estocástica. Recomenda-se que esta metodologia seja replicada na BEA com outros modelos hidrológicos mais sofisticados, a fim de validar sua utilização em outras regiões inclusive de regime hidrológico diferente da área de estudo desta pesquisa.

**Palavras-chave:** Hidrologia estocástica. Regiões semiáridas. Análise de incertezas. Simulação de Monte Carlo.



## ABSTRACT

Most of the hydrological processes that occur in a watershed are, somehow, random. Similarly, the expected impacts are uncertain. Reports of the models used to predict the various impacts (hydrological, economic, environmental, and social) are often uncertain as well. So ignore this uncertainty is ignoring the reality of nature. The objective of this research was (i) to quantify the uncertainties of the  $\lambda$  and CN parameters of the SCS/CN model when applied to an experimental watershed located in the semi-arid region with preserved Caatinga (10 years of rainfall/runoff data, 2005- 2014) and (ii) to propose a method for evaluating the performance of hydrological models. It was evidenced a bimodal behavior in the histograms of the two parameters. This shows that both CN and  $\lambda$  vary due to soil macroporosity conditions provoked by root dynamics in the Caatinga Biome. These facts substantially alter the initial abstractions and ratify the hypothesis that the CN parameter varies from event to event. Therefore, the initial abstractions, influenced by the soil dynamics, contribute significantly to the uncertainties in the hydrological modeling of this watershed. The uncertainty analysis methodology of hydrological models developed here was adequate to the objectives of the study. As long as some fundamental statistical information of the variables, such as the probability density function, is known, it can be reproduced satisfactorily with different models and regions. The simulations based on the Monte Carlo Method hit 5 to 10% of the predictions. This number is not satisfactory and the justifications lie in the simplicity of the SCS/CN model and in the natural uncertainties of the hydrological processes. Due to the wide use of SCS/CN, we suggest that its application is always associated with a stochastic approach. We also recommend that this methodology be replicated in the Aiuaba Experimental Basin with more sophisticated hydrological models in order to validate their use also in regions of different hydrological regime of the study area of this research.

**Keywords:** Stochastic Hydrology. Semiarid regions. Uncertainty analysis. Monte Carlo Simulation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificação de modelos hidrológicos baseada na descrição dos processos segundo Singh (1995) .....	06
Figura 2 – Distribuição espacial das terras secas ( <i>drylands</i> ) no mundo .....	15
Figura 3 – Relação de Ia a S, do NEH-4. A linha traçada é $Ia = 0,2S$ e define a mediana. Metade dos 112 pontos plotados estão entre as linhas tracejadas ..	20
Figura 4 – Mapa de localização da BEA em relação ao estado do Ceará e o Brasil .....	23
Figura 5 – Geologia geral da Estação Ecológica de Aiuaba. A Bacia Experimental de Aiuaba está demarcada em azul na parte inferior da imagem .....	24
Figura 6 – Localização da Bacia Experimental de Aiuaba, solos, associações solo-vegetação (ASV), unidades fitossociológicas, equipamentos e estações de monitoramento hidrológico .....	25
Figura 7 – Histograma de respostas de CN para $\lambda = 0,20$ após análise combinatória. A linha tracejada indica a divisão das regiões de picos .....	33
Figura 8 – Histograma de respostas de CN com destaque das regiões CNa e CNb .....	35
Figura 9 – Gráfico de Probabilidade para região CNa (a) e CNb (b) para $\lambda = 0,20$ .....	35
Figura 10 – Histograma de respostas de CN e $\lambda$ calibrados simultaneamente após análise combinatória .....	37
Figura 11 – Histograma de respostas de $\lambda$ para CN igual a 30 para os eventos da BEA (2005 – 2014) .....	38
Figura 12 – Histograma de respostas de $\lambda$ para CN igual a 30 segundo o que preconiza o NEH-4 para os eventos da BEA (2005 – 2014) .....	39
Figura 13 – Gráfico de contorno de CN, $\lambda$ e coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) para eventos da Bacia Experimental de Aiuaba (BEA) de 2005 a 2014 .....	41
Figura 14 – Gráfico de superfície de CN, $\lambda$ e medida de erro RMSE para eventos da Bacia Experimental de Aiuaba (BEA) de 2005 a 2014. No círculo vermelho identifica-se o ponto ótimo .....	41

Figura 15 – Histograma de respostas do parâmetro CN para os eventos da BEA (2005 – 2014). A calibração foi realizada evento a evento, sem combinações. Admitiu-se $\lambda = 0,20$ .....	43
Figura 16 – Comparação linear entre o escoamento medido e o calculado para CN = 3 e $\lambda = 0,0001$ .....	45
Figura 17 – Relação entre garantia e índice de acerto do modelo SCS/CN. O ponto vermelho indica a nota atribuída ao modelo SCS/CN .....	49

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação de diferentes tipos de incertezas na natureza (segundo BEVEN, 2016) .....	09
Tabela 2 – Representatividade das classes de solo da Bacia Experimental de Aiuaba ...	25
Tabela 3 – Classificação da Bacia Experimental de Aiuaba de acordo com os parâmetros do National Engineering Handbook, seção 4 .....	29
Tabela 4 – Estatística descritiva para a o histograma de respostas de CN para $\lambda = 0,20$ após análise combinatória .....	33
Tabela 5 – Estatística descritiva para ambas as regiões do histograma de respostas (CNa e CNb) .....	35
Tabela 6 – escoamento superficial calculado para $\lambda = 0,0001$ e $CN = 3$ . P = precipitação (mm); $Pe_o$ = Precipitação efetiva observada (mm); $Pe_c$ = Precipitação efetiva calculada (mm); S = potencial máximo de retenção do solo (mm); $I_a$ = abstrações iniciais (mm); $\overline{err}$ = erro médio absoluto .....	44
Tabela 7 – Síntese dos resultados após simulação de eventos de escoamento superficial para 95% de garantia .....	46

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	12
1.1	Colocação do problema.....	12
1.2	Objetivos .....	15
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	16
2.1	Hidrologia estocástica .....	16
2.2	Incertezas na Modelagem Hidrológica.....	19
2.3	Método de Monte Carlo (MMC).....	23
2.4	Desafios da modelagem em regiões semiáridas.....	25
2.5	Modelagem chuva-deflúvio.....	28
2.6	Modelo SCS/CN.....	29
3	MATERIAL E MÉTODOS .....	34
3.1	Caracterização da área de estudo .....	34
3.1.1	<i>Geologia e pedologia</i> .....	35
3.1.2	<i>Vegetação e zona radicular</i> .....	37
3.1.3	<i>Regime hidrológico</i> .....	37
3.2	Dados de precipitação e escoamento.....	38
3.3	Avaliação dos parâmetros CN e $\lambda$ .....	39
3.3.1	<i>Abordagem I: análise combinatória em pares de eventos de precipitação</i> .....	40
3.3.2	<i>Abordagem II: gráfico de superfície e combinações entre CN e <math>\lambda</math></i> .....	41
3.3.3	<i>Abordagem III: avaliação dos parâmetros por evento</i> .....	42
3.4	Simulações de eventos de escoamento .....	43
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	44
4.1	Avaliação dos parâmetros CN e $\lambda$ .....	44
4.1.1	<i>Abordagem I: combinação em pares de eventos de precipitação</i> .....	44
4.1.2	<i>Abordagem II: gráfico de superfície e combinações entre CN e <math>\lambda</math></i> .....	51
4.1.3	<i>Abordagem III: avaliação dos parâmetros por evento</i> .....	53
4.2	Simulações de evento de escoamento.....	57
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	62
	REFERÊNCIAS .....	64
	ANEXO A – SOLUÇÃO GRÁFICA PARA A EQUAÇÃO $Q = (P - 0,2S)^2P + 0,8S$ .....	76
	ANEXO B – CN PARA TERRAS NÃO URBANAS (NEH-4, 1972).....	77

## 1 INTRODUÇÃO

### 1. 1 Colocação do problema

Órgãos de gerenciamento de recursos hídricos, governantes, comitês de bacia e outros participantes envolvidos nas tomadas de decisões em bacias hidrográficas enfrentam um desafio quando precisam optar por uma entre diversas alternativas. Cada uma delas é caracterizada por diferentes valores e critérios que refletirão em populações diretamente dependentes desta decisão (por exemplo, a regularização da vazão de um reservatório que atende a determinada localidade).

Tanto nos processos de tomada de decisão quanto em previsões relacionadas ao meio ambiente existem incertezas que são de grande relevância em relação, por exemplo, aos impactos das mudanças climáticas, transporte de poluentes e manejo sustentável de recursos. No entanto, muitas vezes isto ou é ignorado por cientistas e tomadores de decisão ou é interpretado como um conflito ou desacordo entre estes (BEVEN, 2009).

Incertezas sempre estão presentes ao planejar, desenvolver, gerenciar e operar sistemas de recursos hídricos. Isso ocorre porque muitos fatores que afetam o desempenho destes sistemas não são nem podem ser conhecidos com certeza quando um sistema é projetado, construído e gerenciado (LOUCKS; VAN BEEK, 2005). O sucesso e o desempenho de um sistema dependem frequentemente de fatores incertos, como futuras condições meteorológicas, demográficas, econômicas, sociais, técnicas e políticas, o que pode influenciar os benefícios futuros, os custos e impactos ambientais.

Beck e Van Straten (1983) sugeriam que uma das principais áreas que necessitavam de investigação na Hidrologia era a de estudo das incertezas. Os autores afirmam que havia duas questões-chave: primeiro, o problema da incerteza na estrutura das relações físicas e matemáticas, a hipótese de um modelo particular; e segundo, a incerteza associada às previsões obtidas dos modelos.

De acordo com Loucks e Van Beek (2005), incertezas também surgem devido à natureza estocástica de processos hidrológicos como evaporação, precipitação e temperatura. Da mesma forma, variáveis como futuras populações de cidades, taxas de uso de água per capita, padrões de irrigação e prioridades para uso de água, que afetam sua demanda, nunca são conhecidos com certeza.

A avaliação da disponibilidade hídrica é fundamentalmente um exercício de coleta de dados seguido pela apresentação e interpretação destes dados para fornecer informações sobre as características espaciais e temporais da água e seu uso (WMO, 2012). Portanto, a coleta de dados constitui base fundamental de uma avaliação dos recursos hídricos. Assim, a situação ideal seria uma grande e confiável série histórica de dados relacionados à região que se deseja estudar, visando compreensão do comportamento de tais variáveis. No entanto, para muitas regiões, como o semiárido brasileiro, as estações meteorológicas disponíveis são insuficientes e a qualidade das medidas históricas é muitas vezes questionável (DAMÉ; TEIXEIRA; TERRA, 2008; SOUZA *et al.*, 2012; SOBRINHO *et al.*, 2014).

A extensão e a frequência da coleta de dados devem refletir a variabilidade dos processos no espaço e no tempo. Portanto, encontrar dados adequados para a modelagem hidrológica é um desafio real nessas áreas. Para tanto, utilizam-se largamente técnicas estatísticas aplicadas à Hidrologia (RODDA; LITTLE, 2015).

De acordo com Hines *et al.* (2012), métodos estatísticos são usados para a apresentação, a descrição e a compreensão da variabilidade com que ocorrem fenômenos da natureza. Tais fenômenos são acometidos por incertezas naturais, que incluem as flutuações temporais e espaciais aleatórias inerentes aos processos naturais, e que quase sempre introduzem uma grande quantidade de aleatoriedade nos processos físicos (SINGH, 1995). A modelagem de um processo eivado de incertezas pressupõe inicialmente sua quantificação, realizada por uma variável, aleatória ou não (TUCCI, 2005).

Atualmente há abordagens destinadas a quantificar e compreender as incertezas nos processos hidrológicos em diversas regiões do planeta com uso de modelos menos complexos aos mais sofisticados, seja utilizando dados históricos de áreas urbanas (HAILEGEORGIS; ALFREDSEN, 2017) ou rurais e de florestas (LINHOSS; SIEGERT, 2016; CHO; BONES, 2016).

Beven (1989) afirma que por vezes é vantajoso utilizar modelos menos complexos e menos exigentes em termos de computação e quantidade de parâmetros - por exemplo, para aplicações práticas ou para executar um grande número de casos de teste. O autor afirma ainda que também no caso (não incomum) de dados de entrada incertos ou mal coletados, modelos simples podem competir com modelos complexos.

O método do Número de Curva (ou, em inglês, *Curve Number*, cuja sigla é SCS/CN, do então Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos – SCS, do inglês *Soil Conservation Service*), foi desenvolvido para computar a lâmina escoada em pequenas bacias

em função da lâmina de chuva (SCS, 1972). É amplamente utilizado pela comunidade hidrológica porque é simples, de fácil compreensão e aplicação, estável e representa a maioria das características das bacias hidrográficas, como o tipo de solo, o uso do solo, a condição hidrológica e a condição de umidade antecedente (MISHRA; SINGH, 2003). O método SCS/CN foi originalmente desenvolvido para uso em pequenas bacias agrícolas e desde então foi ampliado e aplicado a bacias hidrográficas rurais, florestais e urbanas. Apesar de várias limitações do método e até mesmo credibilidade questionada por alguns autores (MISHRA; SINGH, 2003; HAWKINS *et al.*, 2009), tem sido contínuo pelo simples motivo de que funciona bem (ZEMA *et al.*, 2017, GUSWA *et al.*, 2018).

Neste trabalho, pretende-se quantificar as incertezas do modelo SCS/CN utilizando dados de precipitação e escoamento superficial de uma bacia experimental localizada em região semiárida do Brasil. Espera-se que a análise de incertezas dos parâmetros, usando o método experimental (associado ao método de simulações de Monte Carlo) gere um histograma de respostas capaz de quantificar as incertezas no modelo utilizado. Adicionalmente, intenciona-se propor um método de avaliação de modelos hidrológicos tomando em consideração suas incertezas.



## 1.2 Objetivos

O estudo tem como objetivo geral avaliar as incertezas do modelo SCS/CN quando aplicado a uma bacia experimental localizada em região semiárida com vegetação de caatinga preservada, por meio de proposição de um método de análise de incertezas de modelos hidrológicos. São objetivos específicos:

- a) Analisar o comportamento e as incertezas inerentes a dois parâmetros do modelo SCS/CN;
- b) Gerar histograma de respostas de escoamento do modelo, tendo como base o método de Monte Carlo;
- c) Avaliar, com base em dados de campo, o desempenho do método proposto para quantificação das incertezas; e
- d) Possibilitar melhor compreensão do processo chuva-escoamento característico de regiões semiáridas.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Hidrologia estocástica

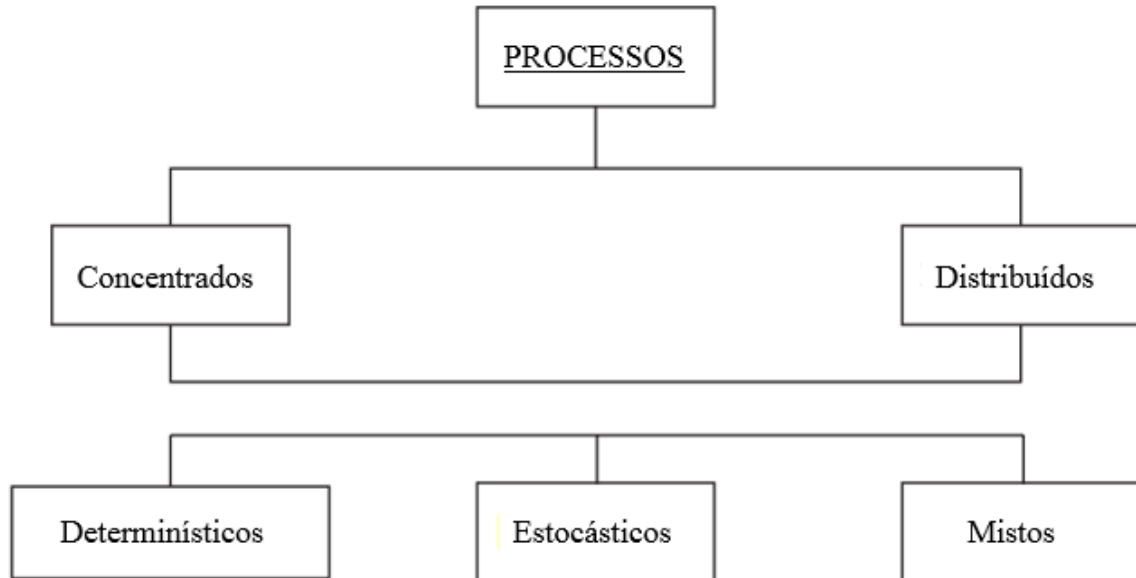
“All models are wrong, but some models are useful.”  
(George Box, 1979)

Conforme definição dada por Chow, Maidment e Mays (1988), a Hidrologia (do grego: ὕδωρ, "hýdōr" que significa "água"; e λόγος, "lógos" que significa "estudo") é a ciência que abrange a ocorrência, distribuição, movimento e propriedades das águas da terra e sua relação com o ambiente dentro de cada fase do ciclo hidrológico. A Hidrologia é, portanto, um assunto de grande importância para as pessoas e o ambiente em que estão inseridas.

Yevjevich (1993), ao fazer uma análise das contribuições para a hidrologia no século passado, revelou dois tipos básicos de desenvolvimento. Primeiro, o autor observou o que chamou de “claro surgimento da hidrologia utilitária” (também chamada Hidrologia Aplicada, Prática ou Engenharia Hidrológica), e o surgimento mais recente do que chamou de Hidrologia Teórica (também chamada Hidrologia Básica, Científica, Analítico-matemática), como os dois polos de todo o espectro hidrológico de atividades e abordagens. O outro tipo de desenvolvimento é a divisão de investigações hidrológicas em Hidrologia Física ou determinística e Hidrologia estatística ou Estocástica.

Existem muitas maneiras diferentes de classificar os modelos hidrológicos (ver, por exemplo, CLARKE, 1973; O'CONNELL, 1991; WHEATER *et al.*, 1993), contudo, neste texto será abordada a classificação dada por Singh (1995) baseada na descrição dos processos hidrológicos. O autor argumenta que os modelos possuem cinco componentes: geometria do sistema (bacia hidrográfica), entrada, leis que governam, condições de contorno e saída. Dependendo do tipo de modelo, esses componentes são combinados de várias maneiras. Isto inclui ainda todos os processos hidrológicos que contribuem para a saída do sistema. Com base na descrição desses processos (Figura 1), em conjunto com as características do sistema, os modelos podem ser descritos como concentrados ou distribuídos, determinísticos ou estocásticos ou mistos.

Figura 1 – Classificação de modelos hidrológicos baseada na descrição dos processos segundo Singh (1995).



Um modelo concentrado (*lumped*, em inglês) é, em geral, expresso por equações que não levam em conta a variabilidade espacial de processos, entrada, condições de contorno e características geométricas do sistema (bacia hidrográfica). Na maioria dos modelos concentrados, alguns processos são descritos por equações diferenciais baseadas em leis hidráulicas simplificadas, e outros processos são expressos por equações algébricas empíricas. A precipitação média de uma bacia é um exemplo da integração espacial da variável de entrada (SINGH, 1995; TUCCI, 2005). Exemplos de modelos concentrados são HEC-1 (HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER, 1981), HYMO (WILLIAMS e HANN, 1972), RORB - *Runoff Routing Program* (LAURENSEN; MEIN, 1983), entre outros.

Os modelos distribuídos (*distributed*, em inglês), explicam explicitamente a variabilidade espacial de processos, entrada, condições de contorno e/ou características do sistema (SINGH, 1995; TUCCI, 2005). É claro que, na prática, a falta de dados de campo é fator impeditivo para uma formulação geral de modelos distribuídos. Tucci (2005) assevera que não existem, de fato, modelos puramente distribuídos, já que são usadas discretizações numéricas que, de alguma forma, tornam o modelo concentrado, numa pequena subdivisão. Exemplos destes modelos são SHE - *European Hydrologic System - Systeme Hydrologique Europeen* (ABBOTT *et al.* 1986a, 1986b), MIKE-SHE (REFSGAARD; STORM 1995),

WATFLOOD (KOUWEN *et al.*, 1993; KOUWEN, 2000) e WASA (GÜNTNER, 2002; GÜNTNER; BRONSTERT, 2004).

Ante isto, o quê, de fato, vem a ser um modelo estocástico? Segundo Chow (1964), se a chance de ocorrência das variáveis é levada em conta, e o conceito de probabilidade é introduzido na formulação do modelo, o processo e o modelo são ditos estocásticos. Todavia, se a chance de ocorrência das variáveis envolvidas no processo é ignorada, e o modelo segue uma lei definida que não a lei das probabilidades, o modelo e os processos são ditos determinísticos.

Já Dooge (1973) definiu que a diferença entre sistemas determinísticos e estocásticos é a seguinte: “quando, para uma mesma entrada, o sistema produz sempre a mesma saída, o sistema é dito determinístico, enquanto que o sistema é estocástico quando a relação entre a entrada e a saída é estatística.” Tucci (2005) afirma que para esta definição as condições iniciais devem ser exatamente as mesmas para certos sistemas.

Singh (1995) alega que a maioria dos modelos é de caráter determinista e praticamente nenhum modelo é totalmente estocástico. Em alguns casos, apenas algumas partes do modelo são descritas pelas leis da probabilidade e outras partes são totalmente determinísticas. É então justo caracterizá-las como semi-determinísticas ou semi-estocásticas. Daniel *et al.* (2011) observa uma vantagem essencial de modelos estocásticos: fornecem a tomadores de decisão a capacidade de determinar a incerteza associada às previsões.

Em Tucci (2005, p.17-18) duas perguntas costumeiramente feitas à hidrólogos(as) são ilustradas pelo autor:

*“Se é possível medir as variáveis hidrológicas por que necessito de um modelo?”* O modelo é utilizado para se antecipar aos eventos, por exemplo, avaliando o impacto da urbanização em uma bacia para que medidas sejam tomadas; previsão de enchentes, impacto da alteração do curso de um rio; ocorrência de eventos extremos estatisticamente possíveis, entre outros. A segunda pergunta, mais pretensiosa: *“se eu disponho de um modelo por que necessito medir a vazão de um rio ou outras variáveis hidrológicas?”* Nenhuma metodologia pode aumentar as informações existentes nos dados, mas pode melhor extrair as informações já existentes. Isto porque, em outros termos, quanto menores as informações, maiores as incertezas dos prognósticos. Os dados permitem aferir os parâmetros e reduzir as incertezas destes nas estimativas das variáveis hidrológicas.”

Nas últimas décadas, uma quantidade considerável de investigações científicas foi desenvolvida no campo da análise de incertezas em Hidrologia, o que elucidava uma nova maneira de lidar com essa ciência, afastando-se das abordagens determinísticas.

## 2.2 Incertezas na Modelagem Hidrológica

“Como sabemos, há conhecimentos conhecidos, há coisas que sabemos que sabemos. Também sabemos que há desconhecimentos conhecidos, isto é, sabemos que existem algumas coisas que não sabemos. Mas também há desconhecimentos desconhecidos, aqueles que não sabemos que não sabemos”.

(Donald Rumsfeld, 2002)

A modelagem e previsão em hidrologia são importantes para fornecer informações para o gerenciamento prático de recursos naturais e riscos naturais. A hidrologia, no entanto, possui severas limitações principalmente nas técnicas de medição nas escalas em que se quer fazer previsões. Um exemplo é o caso dos processos de fluxo subterrâneos, que é onde muitos dos processos hidrológicos ativos ocorrem.

Os primeiros profissionais de hidrologia, que basicamente conceberam, estabeleceram, trataram e processaram observações de variáveis relacionadas à hidrologia, introduziram na prática hidrológica o conceito intuitivo de que todas as variáveis hidrológicas são aleatórias por natureza (mais ou menos regidas pelas leis do acaso) (YEVJEVICH, 1993).

Haan (1989) afirma que incertezas se baseiam em três fontes:

- Dados de entrada: engloba as variáveis meteorológicas, de escoamento e das características físicas do sistema hidrológico, sujeitas a erros de medição (falta de precisão na medição, rede inadequada, erro na transmissão de dados, não aferição dos aparelhos) e a processos de natureza aleatória, com uma incerteza estatística peculiar associada às suas leis de probabilidade;
- Estrutura do modelo: causada pelo fato de que não se pode assegurar que determinado processo hidrológico, ou mesmo todo um sistema, está sendo corretamente modelado, pois a aproximação dos fenômenos reais é inevitável, e isso leva a incertezas. Sendo assim, se fosse possível construir um modelo hidrológico estruturalmente perfeito, capaz de reproduzir o ciclo hidrológico, ainda haveria um resíduo aleatório causado pela incerteza natural;
- Parâmetros: resultado de inadequações nas técnicas para sua estimativa, da limitada representatividade dos dados e de imperfeições na estrutura do modelo. À medida em que determinado processo hidrológico não é representado, ou é modelado de forma simplificada, outros componentes do modelo e seus parâmetros são obrigados a compensar isso para que sejam dados bons resultados.

Algumas incertezas, segundo Beven (2016), podem certamente ser tratadas como aleatórias, mas também podem estar sujeitas a incertezas arbitrárias. A Tabela 1 mostra a classificação de diferentes tipos de incerteza de acordo com o autor.

Tabela 1 – Classificação de diferentes tipos de incertezas na natureza (segundo BEVEN, 2016)

<b>Tipo</b>	<b>Descrição</b>
Aleatória	Incerteza com características estatísticas estacionárias. Pode ser estruturado (tendência, autocorrelação), mas pode ser reduzido a uma distribuição aleatória estacionária.
Epistemológica (dinâmica do sistema)	Incerteza decorrente da falta de conhecimento sobre como representar o sistema em termos de estrutura e parâmetros do modelo. Isso pode incluir coisas que ainda não foram percebidas como importantes, mas que podem resultar na redução do desempenho do modelo quando ocorrerem eventos surpresa.
Epistemológica (dados de entrada e saída)	Incerteza decorrente da falta de conhecimento sobre os dados de entrada ou os dados de resposta com quais saídas do modelo podem ser avaliadas. Isso pode ser devido a questões de medição ou interpolação equivocada quando não são fornecidas informações observadas suficientes para descrever adequadamente as variáveis necessárias no processo de modelagem. Pode ser devido a uma rede de medição limitada, falta de conhecimento sobre como interpretar dados de SIG, por exemplo.
Epistemológica (desinformação)	Incertezas na representação do sistema ou na imposição de dados que são inconsistentes ou errados. Terá a expectativa de introduzir desinformação nos processos de modelagem, resultando em inferência tendenciosa ou incorreta (incluindo falsos positivos e falsos negativos em modelos de teste como hipóteses).
Semântica/Linguística	Incerteza sobre quais declarações relevantes realmente significam. Há exemplos em hidrologia incluindo escoamento superficial, escoamento de base, condutividade hidráulica, estacionaridade, etc.) Isso pode resultar, parcialmente, de questões em que coisas com o mesmo nome têm diferentes significados em diferentes contextos ou escalas.
Ontológica	Incerteza associada a diferentes crenças. Exemplo relevante é sobre se determinado método é apropriado para a representação da natureza dos resíduos de um modelo. Diferentes crenças sobre as hipóteses podem levar a estimativas de incerteza muito diferentes, de modo que toda estimativa de incerteza estará condicionada às crenças subjacentes e suposições consequentes.

Beven (2016) defende que a atual percepção de incertezas é agora muito mais sofisticada, mas que isso não resultou em progressos análogos na quantificação e, mais particularmente, na redução da incerteza. Um dos pontos de vista é o de que existem apenas

incertezas epistemológicas (decorrentes da falta de conhecimento) porque simplesmente não se sabe o suficiente sobre os sistemas hidrológicos, suas entradas e saídas.

Em uma discussão crítica do processo de modelagem distribuída com base física, Beven (1989) apontou para as limitações de modelos distribuídos de sua época e argumentou que uma possível maneira de avançar deve ser baseada na estimativa realista da incerteza.

Beven e Binley (1992) propuseram uma estratégia para calibração de modelos e estimativa de incerteza em modelos. Esta estratégia é chamada de Estimativa de Incerteza por Verossimilhança Generalizada (GLUE, do inglês *Generalized Likelihood Uncertainty Estimation*).

Ao delinear a base do procedimento GLUE, Beven (1989) parte da premissa de que antes da introdução de qualquer informação em modelagem, qualquer combinação de modelo/parâmetro deve ser considerada igualmente provável. Sugere ainda que, uma vez que todas as estruturas do modelo devem, até certo ponto, estarem sujeitas a erro e que todas as observações e medições em que a calibração do modelo se baseia também devem estar sujeitas a erro, então não há razão para esperar que qualquer conjunto de parâmetro representarão um conjunto ideal. A isso o autor chama “equifinalidade”<sup>1</sup>.

Apesar da evidência empírica da equifinalidade (vide BEVEN, 1993; SCHULZ; BEVEN; HUWE, 1999; BRAZIER *et al.*, 2000; BEVEN; FREER, 2001), muitos hidrólogos relutam em adotar a ideia de equifinalidade na modelagem hidrológica (alegando que, na verdade, sempre pode ser evitada concentrando-se na busca de um "ótimo") (GUPTA; SOROOSHIAN; YAPO, 1998; VRUGT *et al.*, 2003).

A respeito da mencionada relutância, Beven (2006) argumenta que há uma questão muito importante no que chama de filosofia de modelagem envolvida que pode explicar a oposição em aceitar esta tese. A ciência, incluindo a ciência hidrológica, deve ser uma tentativa de trabalhar em direção a uma única descrição correta da realidade. Não é plausível concluir que deve haver várias descrições factíveis da realidade. As pessoas que usufruem da pesquisa também (ainda) não esperam tal conclusão e podem, portanto, interpretar a ambiguidade resultante das previsões como um fracasso (ou pelo menos um enfraquecimento) da ciência.

Apesar do ponto de vista de Beven (2016) com relação ao progresso na

---

<sup>1</sup> Equifinalidade implica que qualquer valor de parâmetro determinado por calibração estará condicionado aos outros valores dos parâmetros do modelo, de tal forma que qualquer interpretação deve ser feita com cuidado. Equifinalidade implica incerteza e rejeita um conjunto “ótimo”. Diferentes estruturas de modelos ou conjuntos de parâmetros que são diferentes produzirão, em geral, previsões aceitáveis.

quantificação de incertezas, é seguro afirmar que nunca antes tantas investigações científicas foram desenvolvidas no campo da análise de incertezas em modelagem. Em pesquisa nas bases de dados de periódicos de divulgação científica estão registradas 22.758<sup>2</sup> publicações até o momento de finalização desta dissertação (25/01/2019). Em parte, este vertiginoso crescimento se deve ao veloz avanço tecnológico dos computadores, que oferece benefícios sobretudo relativos à velocidade de processamento e à capacidade de armazenamento de informações.

Vários métodos foram recentemente propostos para quantificar a incerteza dos modelos hidrológicos. Essas técnicas são baseadas em diferentes hipóteses, são de natureza diversa e produzem resultados que podem diferir significativamente em alguns casos (a proposta desta pesquisa será elucidada na seção 3.3 Avaliação dos parâmetros CN e  $\lambda$ ).

Blazkova e Beven (2002) realizaram estimativa da frequência de enchentes por simulação contínua para uma bacia tratada como não monitorada em região montanhosa da República Tcheca. Os resultados foram comparados com uma série histórica de vazões máximas anuais disponíveis no local. Os resultados se comparam bem e parecem fornecer limites de previsão realistas, particularmente para períodos de retorno mais longos.

Ao avaliarem incertezas da modelagem de escoamento superficial devido a variações temporais da intensidade da chuva na Alemanha, Bronstert e Bárdossy (2003) mostraram resultados que tais variações são essenciais para a geração de escoamento superficial em encostas.

Estudos recentes em regiões semiáridas foram desenvolvidos com maior proeminência na China, sobretudo em áreas do Loess Plateau<sup>3</sup> ou adjacentes (LIU et al., 2012; ZHAO et al., 2017; XUE et al., 2018; ZHAO et al., 2018). Xue et al. (2018), utilizando o modelo semi-distribuído TOPMODEL, evidenciaram que a incerteza das simulações resultou principalmente dos parâmetros e estruturas do modelo, fatores climáticos e antropogênicos. Estas pesquisas são valiosos complementos para a identificação do mecanismo dos processos hidrológicos em áreas áridas.

---

<sup>2</sup> A busca foi refinada para periódicos revisados por pares e contendo os seguintes termos: *Uncertainty analysis, watersheds, runoff, Hydrologic Models, Water Resources, Rainfall, Climate Change, Hydrology*

<sup>3</sup> O Loess Plateau é uma área de 640.000 km<sup>2</sup> localizada na região central da China. Formou um dos primeiros berços da civilização chinesa. Seu sedimento erodido é responsável pela grande fertilidade da planície norte da China, e está sujeito às repetidas e destrutivas inundações do Rio Amarelo. Seu solo tem sido chamado de "mais altamente erodível na terra" e os esforços de conservação e manejo da terra são um dos principais focos do desenvolvimento científico Chinês.



### 2.3 Método de Monte Carlo (MMC)

Dados como temperatura, precipitação, vazões, entre outros, gerados artificialmente foram chamados sintéticos para distingui-los das observações históricas (FIERING, 1967). Esta prática foi chamada de Modelagem Hidrológica Estocástica, como dito anteriormente.

Estudos de simulação de bacias hidrográficas podem utilizar vários conjuntos de sequências de vazões, precipitação, evaporação e/ou temperatura para avaliar as propriedades estatísticas do desempenho de modelos ou sistemas de recursos hídricos (LOUCKS; VAN BEEK, 2005). Para este propósito, é imperativo que a série sintética gerada se assemelhe estatisticamente àquelas sequências utilizadas durante o período de planejamento, isto é, à série histórica disponível.

Modelos que possuem entradas aleatórias, geralmente, produzem saídas aleatórias. Após muitas simulações, as distribuições de probabilidade de cada valor da variável de saída aleatória podem ser definidas. Isto pode ser usado para estimar a confiabilidade e outras características estatísticas dessas distribuições de saída. Esse processo de geração de múltiplas entradas aleatórias para múltiplas simulações para obter múltiplas saídas aleatórias é chamado de Simulação de Monte Carlo (LOUCKS; VAN BEEK, 2005).

As simulações de Monte Carlo (Ou Método de Monte Carlo, MMC) pode ser sucintamente descrito como um método estatístico no qual uma sequência de números aleatórios é utilizada para realizar a simulação de um processo.

O nome Monte Carlo se deve ao principado de Mônaco, célebre por seus complexos de entretenimento e casas de jogos, entre eles o mais famoso, o Casino de Monte Carlo<sup>4</sup>. Segundo Silva (2008), a justificativa para o nome reside no fato das simulações por esse método estarem baseadas em eventos que ocorrem aleatoriamente e, ainda, por terem uma similaridade com jogos de azar.

De maneira geral, o MMC é baseado em uma abordagem estatística que busca obter estimativas de dados observáveis, tais como médias temporais, por meio de algum processo de amostragem de dados (escolhidos de maneira aleatória) do sistema em estudo (RUBINSTEIN; KROESE, 2007). O MMC é particularmente útil quando se deseja estudar comportamentos de sistemas com grande número de parâmetros. Ou seja, em condições de incerteza, uma

---

<sup>4</sup> O artigo intitulado “The Monte Carlo Method”, publicado em 1949 no Journal of the American Statistical Association) pelos matemáticos Metropolis e Ulam (1949) marca o primeiro registro do método com este nome.

alternativa para a obtenção de resultados esperados ou para avaliação de riscos de eventos extremos, por exemplo, podem ser expressos através da utilização do método. No caso desta dissertação, utilizou-se para gerar uma série sintética de dados de escoamento superficial.

Silva (2008) afirma que a única exigência do método é que o sistema físico ou matemático seja descrito (modelado) em termos de funções de densidade de distribuição de probabilidade (FDP). Uma vez conhecidas essas distribuições, a Simulação de Monte Carlo pode proceder fazendo as amostragens aleatórias a partir das mesmas. Este processo é repetido inúmeras vezes e o resultado desejado é obtido por meio de técnicas estatísticas (média, desvio padrão, etc.) sobre um determinado número de realizações (amostras) que podem chegar a milhões.

As simulações de Monte Carlo são efetuadas por meio de amostragens das funções densidade de probabilidade (YORIYAZ, 2009). Essas amostragens são realizadas através de números aleatórios, portanto, qualquer programa computacional que utiliza o MMC demanda um gerador de números aleatórios. Aplicações de Monte Carlo vem sendo ao longo do tempo uma ferramenta amplamente utilizada em investigações científicas na Hidrologia.

Kuczera e Williams (1992) desenvolveram um procedimento para analisar parâmetros de modelos e incertezas de dados de chuva separadamente. Eles utilizaram simulações de Monte Carlo para gerar amostras aleatórias dos parâmetros do modelo e da precipitação em uma pequena bacia de Sydney, na Austrália. Observaram que seu procedimento, na prática, poderia ser limitado pela disponibilidade de dados suficientes para identificar e calibrar um modelo.

O uso do MMC também é encontrado em aplicações ecohidrológicas, como o trabalho de Ma *et al.* (2000). Os autores realizaram análise da sensibilidade de um modelo de qualidade de água aplicado à zona radicular usando a simulação de Monte Carlo.

Hailegeorgis e Alfredsen (2017) analisaram eventos extremos de precipitação e escoamento de bacia urbana na Noruega, incluindo incertezas e confiabilidade no projeto visando melhorias no gerenciamento da infraestrutura urbana. Os autores destacam que a abordagem de amostragem de Monte Carlo é comumente usada para ilustrar a incerteza devido à amostras curtas, como era o caso da área de estudo.

Outros experimentos exploram Algoritmos Genéticos, metodologia com Cadeias de Markov (*Monte Carlo Markov Chain*, em inglês) (por exemplo, KUCZERA, 1997, KUCZERA; PARENT, 1998), e outras abordagens são descritas na revisão feita por Liu e Gupta (2007).

No trabalho para a Bacia Experimental de Aiuaba foram geradas séries sintéticas

dos dois parâmetros do modelo hidrológico SCS/CN, que originaram séries de lâminas de escoamento superficial para valores de precipitação pluviométrica observados.

#### **2.4 Desafios da modelagem em regiões semiáridas**

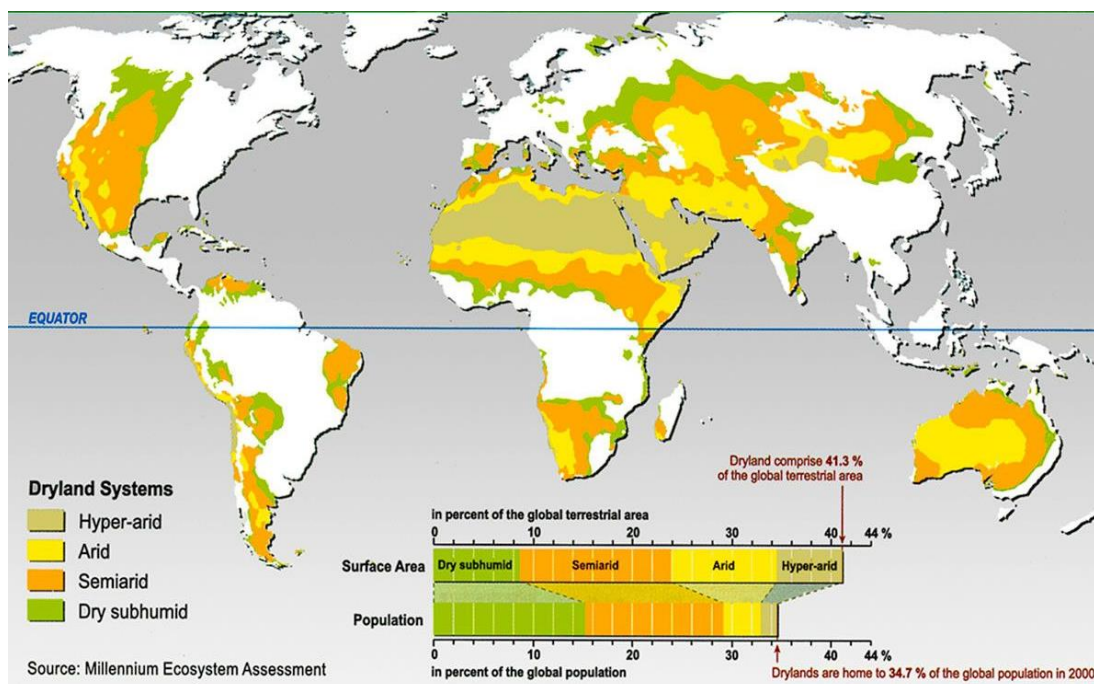
Nas regiões áridas e semiáridas os recursos hídricos são limitados e sob pressão severa e crescente devido à expansão das populações. Isso aumenta o consumo da água per capita e para irrigação (WHEATER; SOROOSHIAN; SHARMA, 2008).

Somada a essas pressões, está a ameaça incerta das mudanças climáticas, fontes de poluição pontual e difusa, aumento dos volumes de resíduos industriais e domésticos e a captação excessiva das águas subterrâneas, que representam uma grande ameaça para esses recursos já escassos. Nitidamente, o gerenciamento eficaz da água é essencial, e isso requer sistemas apropriados de apoio à decisão, incluindo ferramentas de modelagem.

Os processos hidrológicos em áreas semiáridas, como infiltração, escoamento e erosão do solo, são altamente variáveis no espaço e no tempo. Inundações são pouco frequentes, mas extremamente prejudiciais, e a ameaça de enchentes para vidas e infraestrutura está aumentando devido ao desenvolvimento urbano (MAYOR; BAUTISTA; BELLOT, 2009). Os ecossistemas são frágeis e ameaçados pelas abstrações das águas subterrâneas e pelo gerenciamento dos fluxos de superfície. O conhecimento das fontes e padrões de variação desses processos e seus fatores de controle é crucial para a compreensão e modelagem do funcionamento hidrológico dos ecossistemas semiáridos (WHEATER; SOROOSHIAN; SHARMA, 2008).

As faixas terrestres que abrangem regiões secas (*drylands*, em inglês) são acometidas por severos períodos de seca, o que - além de outros fatores climatológicos elucidados adiante - as caracterizam como áridas ou semiáridas. São exemplos: parte norte da África, Oriente Médio, sul da Ásia, México, a costa ocidental da América do Sul e o nordeste do Brasil (Figura 2) (HERRERA-PANTOJA; HISCOCK, 2015). Isto gera importantes impactos na economia, saúde do ecossistema, agricultura, produção de energia e quantidade e qualidade da água (MENDOZA, 2005; KUSANGAYA *et al.*, 2014; SELBY; HOFFMANN, 2014).

Figura 2 – Distribuição espacial das regiões secas (*drylands*) no mundo.



Fonte: Beltagy e Madkour (2012)

O semiárido brasileiro é considerado um dos mais complexos do planeta. Muito se deve ao sistema de circulação atmosférica predominante nesta região e a proximidade à linha do Equador, que também age como fator diferencial no padrão climático desta e de outras regiões semiáridas (MONTE-MOR, 2012; DA SILVA *et al.*, 2012).

Historicamente, a região Nordeste do Brasil sempre foi afetada por grandes secas ou grandes cheias. Relatos de secas na região podem ser encontrados desde o século XVII, quando os portugueses chegaram às terras (MAGALHÃES *et al.*, 1988, conforme MARENCO, 2011). Na porção semiárida nordestina essa variabilidade climática sempre é sinônimo de aflição para as populações rurais e tem sido objeto de preocupação da sociedade e de setores do governo ao longo dos anos.

Para Furtado (1998, p. 18), que dedicou grande parte de sua obra a entender as problemáticas de desenvolvimento do Nordeste Brasileiro:

“O Nordeste não é uma região árida, mas semiárida, de um tipo muito particular, porque a precipitação pluviométrica é normalmente alta, mas sua estrutura social é muito frágil, porque depende diretamente da agricultura. E quando a agricultura desaparece, por causa da seca, fica-se sem comida.”

Diversos estudos continuam sendo desenvolvidos em busca de explicações para a variabilidade das chuvas que geram tantas incertezas na região, associando a precipitação

pluviométrica do Nordeste Brasileiro a eventos climáticos de escalas sazonais, interanuais e decadais (ANDREOLI; KAYANO, 2007; DA SILVA, 2009; SANTOS; MANZI, 2011; ANDRADE *et al.*, 2016; COSTA; DA SILVA, 2017).

Para muitas localidades do semiárido brasileiro, as estações meteorológicas disponíveis são insuficientes e a qualidade das medidas históricas é muitas vezes questionável (DAMÉ; TEIXEIRA; TERRA, 2008; SOUZA *et al.*, 2012; SOBRINHO *et al.*, 2014). Infelizmente esta escassez de informações não é exclusividade do Brasil.

Como discutido por Pilgrim, Chapman e Doran (1988), a falta de dados observados nessas regiões acentua a necessidade de sintetizar dados por modelagem, enquanto ao mesmo tempo aumenta a dificuldade da tarefa. Mesmo em regiões úmidas onde uma grande quantidade de trabalhos foi realizada, a modelagem hidrológica é, na melhor das hipóteses, de precisão moderada, e envolve muitas suposições, simplificações e médias no espaço e no tempo.

De acordo com relatório da década de 1970, UNESCO (1979), citado por Pilgrim, Chapman e Doran (1988), quase metade dos países do mundo enfrentavam problemas de aridez naquela época. Portanto, há uma necessidade óbvia de uma melhor compreensão da hidrologia das regiões áridas e semiáridas, e para o desenvolvimento de técnicas apropriadas para modelar escoamento superficial, águas subterrâneas e sua recarga, e outros aspectos da hidrologia.

Existem muitas razões que justificam a insuficiência de informações hidroclimáticas. Para Wheeler, Sorooshian e Sharma (2008) as populações são geralmente escassas e os recursos econômicos limitados; além disso, o clima é severo e eventos de precipitação mesmo infrequentes, podem ser prejudiciais. No entanto, a ausência geral de dados confiáveis de longo prazo e, por consequência, pesquisas experimentais, gerou uma tendência a se basear na experiência e modelagem de zonas úmidas. Na melhor das hipóteses, esses resultados serão altamente imprecisos. Na pior das hipóteses, estas adaptações acarretam perigo real de se adotar soluções de gerenciamento inadequadas, que ignoram as características específicas da resposta das terras secas.

É altamente provável que maiores erros e incertezas em hidrologia de regiões semiáridas continuem a caracterizar os resultados. O reconhecimento desses problemas é fundamental para uma abordagem realista da modelagem de *drylands* e para uma interpretação e aplicação racional dos resultados obtidos.

## 2.5 Modelagem chuva-deflúvio

Acredita-se que a história do estudo da relação entre precipitação e escoamento tenha começado há cerca de 300 anos com o relatório sobre as medidas quantitativas em hidrologia, publicado por Perreault em 1674 (LINSLEY, 1982). Ao comparar a precipitação anual medida ( $P_a$ ) e o fluxo anual estimado de fluxo ( $Q_a$ ) do rio Sena perto de Paris, Perreault descreveu uma relação funcional como  $Q_a = P_a/6$ .

No contexto da hidrologia moderna, o desenvolvimento desta relação é muito primitivo, mas foi uma grande descoberta à época.

Mishra e Singh (2003) relatam que a maioria dos trabalhos históricos de desenvolvimento no campo da modelagem chuva-vazão ocorreu na primeira metade do século XX. Eles afirmam ainda que a década de 1930 experimentou uma explosão em todas as frentes da hidrologia. As ferramentas desenvolvidas nos anos trinta e quarenta para resolver problemas práticos formam as bases para os desenvolvimentos atuais.

A Segunda Guerra Mundial no período 1940-1945 trouxe um retrocesso temporário aos avanços hidrológicos. O período seguinte de 1945 a 1950 foi um período de reencaminhamento e recuperação. A revolução digital que começou na década de 1960 e os avanços subsequentes nas instalações de computação proporcionaram uma variedade de ferramentas de modelagem (MISHRA e SINGH, 2003; TUCCI, 2005).

Neste período apareceram os primeiros modelos que reuniam vários processos para descrever a transformação da precipitação em vazão. Exemplos são o SSARR - *Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation* (U.S. ARMY ENGINEERS, 1972; ROCKWOOD, 1982) e Stanford IV (CRAWFORD; LINSLEY, 1966) nos Estados Unidos, o HBV, na Suécia (BERGSTRÖM, 1995) UBC do Canadá, e WBM da Austrália (SINGH, 1995).

Buscando detalhar o comportamento em bacias hidrográficas com relação a uso do solo, mormente agricultura com objetivo de avaliação de transporte de sedimentos, qualidade de água e escoamento, foram desenvolvidos modelos como CREAMS - *Chemicals, Runoff And Erosion From Agricultural Management Systems* (KNISEL, 1980) e ANSWERS - *Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response Simulation* (BEASLEY; MONKE; HUGGINS, 1981).

A forma basilar dos modelos disponíveis de chuva-escoamento pode, em geral, ser expressa sob a forma de certa vazão d'água, ou lâmina, por um período de tempo determinado como:

$$Q = P - L \quad (01)$$

em que: Q é a quantidade de escoamento, P é a quantidade de precipitação, L é a quantidade de abstrações hidrológicas, como interceptação, armazenamento em depressões, infiltração, evaporação e evapotranspiração.

Segundo Beven (2012), existem muitas razões que explicam os porquês da modelagem chuva-deflúvio, sendo a principal razão o resultado das limitações das técnicas de medição hidrológica. Afinal, de acordo com o autor, não se pode medir tudo o que se necessita saber sobre processos hidrológicos.

De fato, tem-se atualmente ainda uma gama limitada de técnicas de medição e uma no espaço e no tempo. Portanto, é necessário um meio de extrapolar as medições disponíveis no espaço e no tempo, particularmente para áreas não-monitoradas (onde as medições não estão disponíveis) e para o futuro (onde as possíveis medições ainda não ocorreram) para avaliar o provável impacto de futuras mudanças hidrológicas, por exemplo (BEVEN, 2012).

## 2.6 Modelo SCS/CN

Um dos métodos amplamente utilizados para simular um evento de escoamento gerado pela chuva é o método do Número da Curva (CN) do Serviço de Conservação do Solo (SCS/CN, atualmente *Natural Resources Conservation Service* - NRCS). Os principais elementos do processo de escoamento da precipitação, conforme incorporado no método SCS/CN, são (a) características da bacia; (b) precipitação; (c) abstrações hidrológicas, incluindo interceptação, infiltração, evaporação, evapotranspiração (CHOW; MAIDMENT; MAYS, 1988; PONCE; HAWKINS, 1996; MISHRA; SINGH, 2003).

De acordo com o *National Engineering Handbook*, na seção 4 (NEH-4), documento do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) que detalha o desenvolvimento do modelo, o método foi desenvolvido para estimar o escoamento total dada uma precipitação. Ou seja, a relação exclui o tempo como uma variável. A intensidade da chuva é ignorada, consequentemente.

O NEH-4 descreve o desenvolvimento do modelo da seguinte maneira:

A equação do modelo SCS/CN é expressa por:

$$Q = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \text{ para } P > I_a \quad (1)$$

$$Q = 0 \text{ se } P \leq I_a$$

Em que  $Q$  = lâmina de escoamento;  $P$  = altura da precipitação;  $I_a$  = abstrações iniciais;  $S$  = retenção máxima de potencial do solo.

A derivação que se segue é de Mockus (1949). Não possui base física, mas satisfaz o princípio de conservação de massa. Uma curva traçada para uma parcela do escoamento total em comparação com a precipitação total é côncava para cima e mostra que nenhum escoamento ocorre para pequenas precipitações. A tendência seria portanto que à medida que a chuva aumenta a curva se torna assintótica. O objetivo de Mockus era determinar uma equação que descrevesse esse padrão.

Primeiro considerou a condição na qual nenhuma abstração inicial ocorre (ou seja,  $I_a = 0$ ). Mockus concluiu que uma curva apropriada resultava da relação entre precipitação, escoamento e retenção (a chuva não convertida em escoamento) dada por:

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

Em que  $F$  = retenção real após o escoamento começar;  $S$  = retenção máxima potencial após o escoamento começar ( $S > F$ );  $Q$  = escoamento real;  $P$  = precipitação real ( $P > Q$ ).

Para satisfazer a conservação de massa:

$$F = P - Q \quad (3)$$

Substituindo a definição de  $F$  na equação 2 tem-se:

$$\frac{P - Q}{S} = \frac{Q}{P} \quad (4)$$

Resolvendo, para obter  $Q$ :

$$Q = \frac{P^2}{P + S} \quad (5)$$

Esta é a relação chuva-vazão na qual a abstração inicial é zero. Quando a abstração inicial não é zero, a quantidade de precipitação disponível para o escoamento é  $(P - I_a)$  em vez de  $P$ . Substituindo  $(P - I_a)$  por  $P$  na equação 5:

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

Esta é a relação chuva-vazão com a abstração inicial explicitamente considerada.



As abstrações consistem principalmente de interceptação, infiltração durante as primeiras partes da tempestade e armazenamento de depressão superficial (HAWKINS *et al.*, 2009).

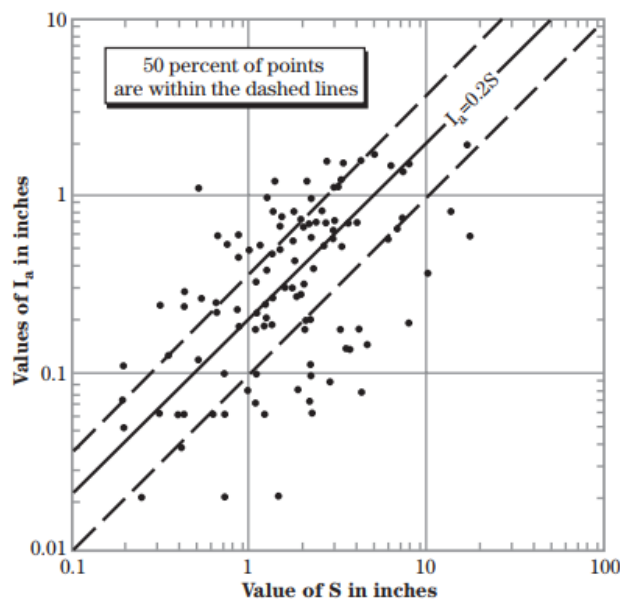
As perdas de água por interceptação e depressões na superfície do solo podem ser estimadas a partir das condições de cobertura vegetal e de superfície. Todavia, a infiltração durante o início da chuva é altamente variável e dependente de fatores como a intensidade, formação de regiões impermeáveis no solo e umidade do solo.

Assim, foi considerado que  $I_a$  é uma função da máxima retenção de potencial,  $S$ . Uma relação empírica entre  $I_a$  e  $S$  foi expressa:

$$I_a = 0,2S \quad (7)$$

Expressar  $I_a$  como uma simples fração do índice de armazenamento  $S$  simplifica muito a equação e sua aplicação, independentemente da realidade hidrológica. No entanto, o *background* teórico para a expressão  $I_a = 0,2S$  é um tanto vago (MISHRA; SINGH, 2003; HAWKINS *et al.*, 2009). O NEH-4 mostra apenas um gráfico (Figura 3) de  $I_a$  e  $S$  com uma linha de  $I_a = 0,2S$  separando os dados (112 pontos) em duas amostras de tamanho igual. Os pontos plotados na figura são derivados de dados experimentais de bacias hidrográficas. O trabalho de Chen (1976) foi pioneiro no questionamento da universalidade da razão  $I_a/S$ , e primeiro sugeriu a adoção do símbolo  $\lambda$  (lambda).

Figura 3 - Relação de  $I_a$  a  $S$ , do NEH-4. A linha traçada é  $I_a = 0,2S$  e define a mediana. Metade dos 112 pontos plotados estão entre as linhas tracejadas.



Fonte: Hawkins *et al.* (2009).

Ao traçar os dados para P e Q de muitas bacias hidrográficas, o SCS encontrou curvas (disponível no ANEXO A deste trabalho). Para padronizar estas curvas, um número de curva adimensional CN foi definido de tal forma que  $0 < CN < 100$ . Para superfícies impermeáveis  $CN = 100$ ; para superfícies naturais  $CN < 100$ . Os parâmetros CN e S se relacionam da seguinte maneira:

$$CN = \frac{1000}{10+S} \qquad S = \frac{1000}{CN} \qquad (8)$$

Para utilização do modelo no sistema métrico (escoamento e precipitação em mm), basta a multiplicação por 25,4. O parâmetro CN foi desenvolvido para que houvesse um coeficiente solo/uso da terra/cobertura com uma relação positiva direta com o Q calculado, e que variasse convenientemente de 0 a 100. Os números 10 e 1000 na equação (8), embora em polegadas, não têm significado intrínseco, e o CN é adimensional. Seu valor é tabelado, segundo três informações que devem ser conhecidas: uso da terra, tratamento e Grupo Hidrológico do Solo (GHS).

No método, os efeitos das condições de superfície de uma bacia hidrográfica são avaliados por meio de classes de uso e tratamento da terra. O *uso da terra* é a cobertura e inclui todo tipo de vegetação, serapilheira, pousio, solo nu, assim como usos não-agrícolas, superfícies hídricas (lagos, pântanos) e superfícies impermeáveis (estradas, telhados). O *tratamento* da terra se aplica principalmente aos usos da terra agrícola e inclui práticas mecânicas, como contorno ou terraços, e práticas de manejo, como controle de pastejo ou rotação de plantações. As classes consistem em combinações de uso e tratamento que realmente ocorrem em bacias hidrográficas.

A inclinação da superfície do solo não é considerada quando se atribui grupos hidrológicos do solo. Sucintamente, o GHS é determinado pela camada de solo que transmite a água com mais ou menos facilidade para qualquer camada que seja mais ou menos impermeável. Varia de A (mais propenso a escoamento) a D (menos propenso).

O modelo SCS/CN é frequentemente interpretado como uma equação de infiltração, por exemplo, nos trabalhos de Yu (1998) e Mishra, Kumar e Singh (1999). Contudo, suas origens estão na análise de volumes de pequenas bacias feita por Mockus (1949), como dito anteriormente, que não incluía o excesso de infiltração como mecanismo de geração de escoamento.

A abordagem do modelo SCS/CN para prever escoamento superficial tem sido objeto de várias revisões críticas (por exemplo, HJELMFELT *et al.*, 1982; PONCE; HAWKINS,

1996; MICHEL *et al.*, 2005).

Mishra e Singh (1999) mostram que sua versão generalizada do método apresenta melhores resultados do que a formulação original (com  $\lambda = 0,20$ ), e traz um parâmetro adicional de ajuste.

Hjelmfelt *et al.* (1982) sugerem que o parâmetro CN, ao invés de ser considerado como uma característica para uma dada associação solo-cobertura do solo, pode ser melhor considerado como uma variável estocástica.

A despeito das limitações mencionadas, o modelo SCS/CN tem sido amplamente utilizado em procedimentos recomendados pelo USDA/SCS (1986) e forneceu um componente de escoamento no desenvolvimento de um abundante número de modelos de qualidade de água e erosão, por exemplo. Incluem-se *Areal Nonpoint Source Watershed Environment Response System* (ANSWERS, BEASLEY; MONKE; HUGGINS, 1977); o *Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems* (CREAMS, KNISEL, 1980); *Simulator for Water Resources in Rural Basins* (SWRRB, ARNOLD; WILLIAMS, 1995); *Erosion Productivity Impact Calculator* (EPIC, WILLIAMS *et al.*, 1984); *Water Erosion Prediction Project* (WEPP, NEARING *et al.*, 1989); *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT; ARNOLD *et al.*, 1998).

Sua ampla utilização se justifica também no fato de os valores tabelados do parâmetro CN fornecem uma maneira relativamente fácil de incrementar em um conjunto de dados de SIG sobre solos e vegetação para um modelo chuva-deflúvio (por exemplo, SHADEED e ALMASRI, 2010).

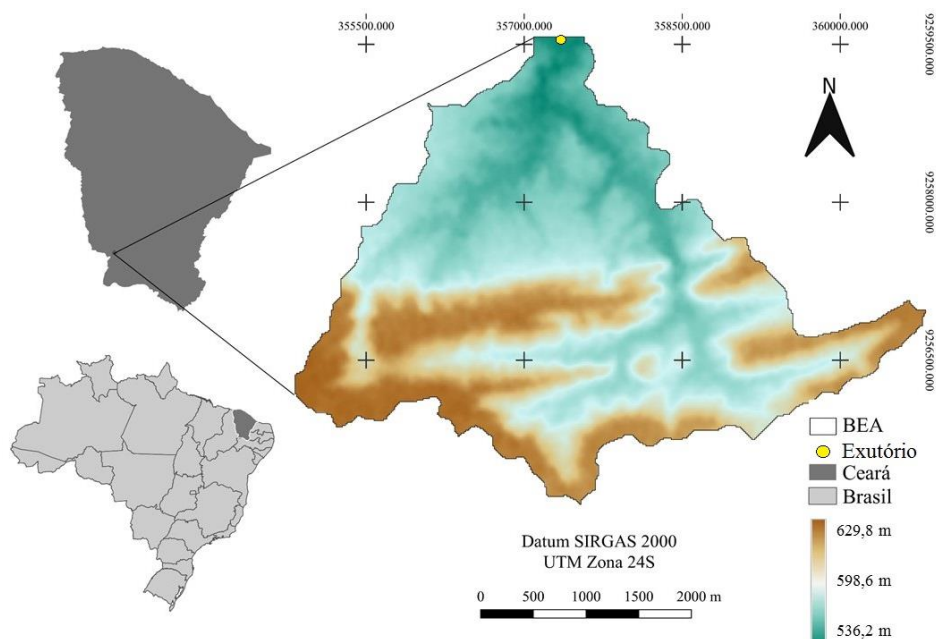
### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Caracterização da área de estudo

As informações de precipitação e escoamento superficial são provenientes de banco de dados da Bacia Experimental de Aiuaba (BEA), pertencente ao Grupo de Pesquisa Hidrossedimentológica do Semiárido ([www.hidroсед.ufc.br](http://www.hidroсед.ufc.br)), que desde janeiro de 2003 monitora processos hidrológicos (ARAÚJO; PIEDRA, 2009; FIGUEIREDO *et al.*, 2016; RODRIGUES; ARAÚJO, 2017), sedimentológicos (MEDEIROS; ARAÚJO; BRONSTERT, 2009; MEDEIROS *et al.*, 2014) e ec hidrológicos (COSTA *et al.*, 2013; PINHEIRO *et al.*, 2013; 2016) nesta região. A bacia é monitorada em termos de precipitação, teor de umidade do solo, índice de área foliar, evaporação, vazão do rio, nível de água do reservatório e escoamento superficial.

Localizada no município homônimo, estado do Ceará (Figura 4), a BEA possui cerca de 12 km<sup>2</sup> e está entre as coordenadas geográficas 6° 34' 25" S e 40° 07' 25" W. Os limites da bacia estão inteiramente inseridos na Estação Ecológica de Aiuaba (ESEC Aiuaba) estabelecida em 1978 e gerenciada desde então pelo IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis) e pelo ICMbio (Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade).

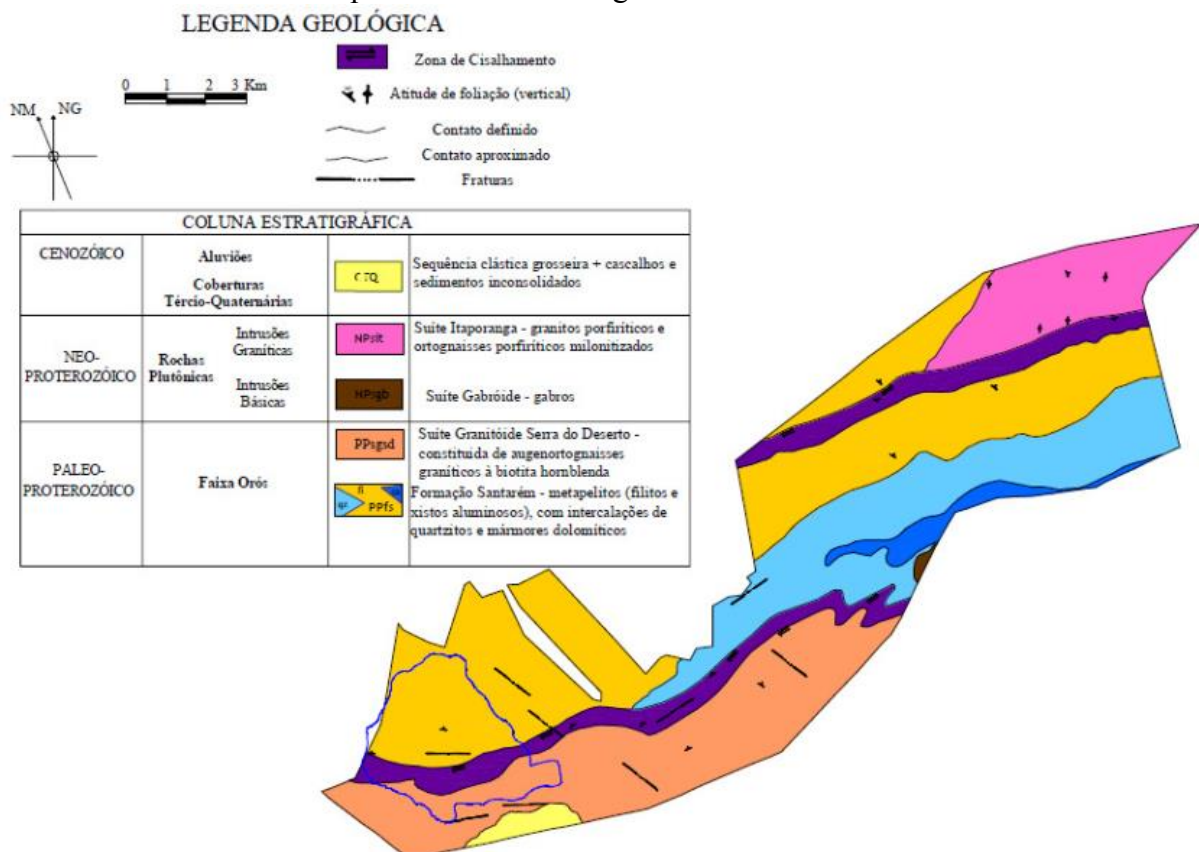
Figura 4 - Mapa de localização da BEA em relação ao estado do Ceará e o Brasil.



### 3.1.1 Geologia e pedologia

A bacia é caracterizada por transição entre um complexo cristalino e uma formação sedimentar (COSTA, 2012; PINHEIRO *et al.*, 2016) (Figura 5). No extremo sul ocorrem gnaisses acinzentados de textura fina a média contendo megacristais de feldspato (FARIAS; ARAÚJO, 2008); ao norte e na porção central ocorrem rochas metassedimentares, metapelitos (filitos e xistos aluminosos), com intercalações de quartzito e mármores dolomíticos (Formação Santarém) (COSTA, 2012).

Figura 5 - Geologia geral da Estação Ecológica de Aiuaba. A Bacia Experimental de Aiuaba está demarcada em azul na parte inferior da imagem



Fonte: Costa (2012).

Araújo (2012) identificou quatro classes de solo na BEA (Figura 6 e Tabela 2). A mais presente é a dos Neossolos Litólicos Distróficos fragmentários, ocupando quase metade da extensão da bacia e mais evidenciada em áreas mais elevadas. Já a menos evidente é a dos Latossolos Vermelho-Amarelos Distróficos típicos, ocupando apenas uma pequena faixa situada no divisor sudoeste da bacia.

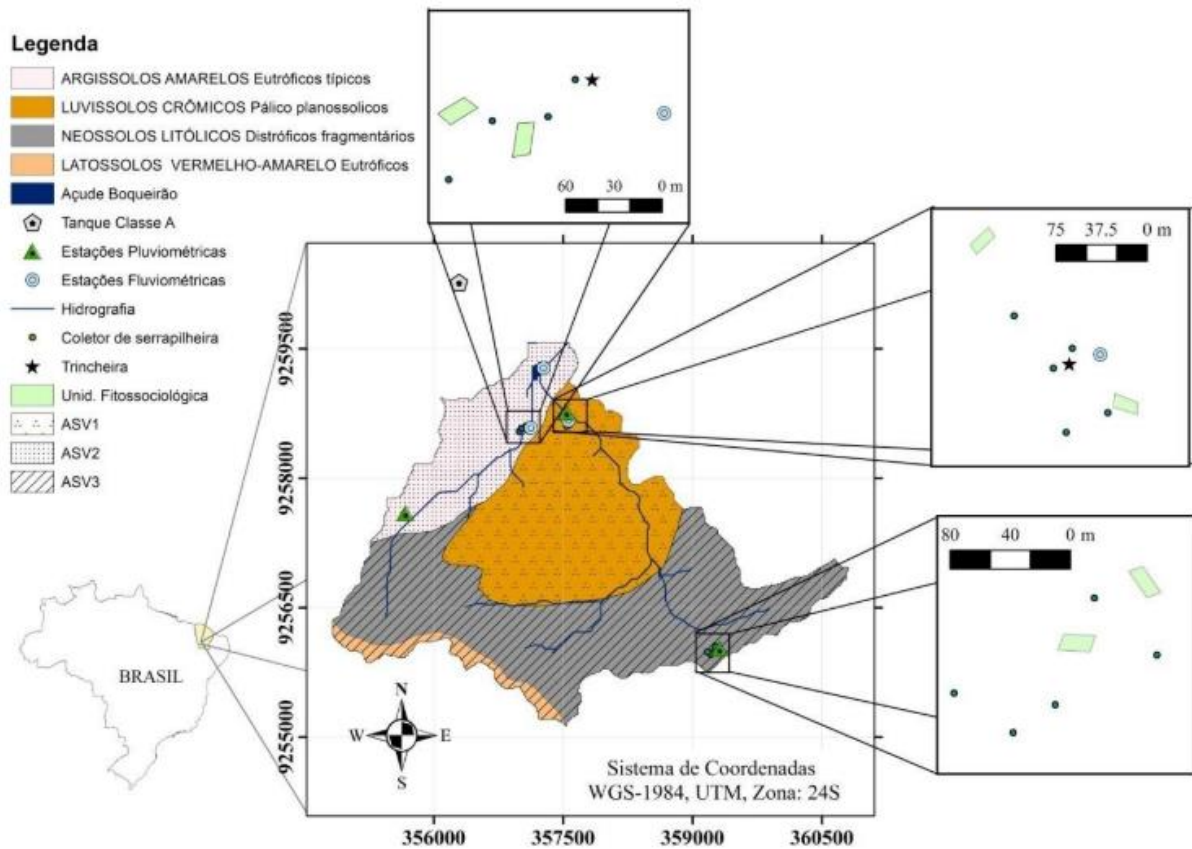
Tabela 2 - Representatividade das classes de solo da Bacia Experimental de Aiuaba

Classe de solos	Área (ha)	Área (%)
ARGISSOLOS AMARELOS Eutróficos típicos	210	17
ATOSSOLOS VERMELHO-AMARELO Distróficos típicos	40	3
LUVISSOLOS CRÔMICOS Pálico planossolicos	421	34
NEOSSOLOS LITÓLICOS Distróficos fragmentários	571	46

Fonte: Araújo (2012)

Güntner e Bronstert (2004); Costa *et al.* (2013) e Pinheiro *et al.* (2013) subdividiram a bacia em três sistemas denominados Associações Solo-Vegetação (ASV, Figura 6) como unidades homogêneas para estudos das variáveis ambientais, apesar da heterogeneidade observada em cada ASV, promovida pela interação do relevo, altitude, solo, e vegetação.

Figura 6 - Localização da Bacia Experimental de Aiuaba, solos, associações solo-vegetação (ASV), unidades fitossociológicas, equipamentos e estações de monitoramento hidrológico.



Fonte: Almeida (2016).

### 3.1.2 Vegetação e zona radicular

A vegetação predominante, Caatinga, é caracterizada por árvores de porte médio a alto, de 5 a 12 m, com espaçamento irregular entre as plantas, como apontam os trabalhos de Costa (2012) e Pinheiro *et al.* (2013). Em 2009, a catalogação apenas de plantas com diâmetro do caule no nível da superfície do solo maior que 3 cm resultou em uma densidade de 7700 unidades / ha (MEDEIROS; ARAÚJO; BRONSTERT, 2009).

Referidas anteriormente, as ASV são distribuídas da seguinte maneira na bacia: a ASV1 ocupa 11% da BEA sendo representada por Catingueira (*Caesalpinia pyramidalis* Tul) associada ao Argissolo Vermelho-Amarelo; a ASV2 representada por Angelim (*Piptadenia obliqua*) associada ao Luvisolo Hipocrômico ocupa 57%; e a ASV3 ocupa 32% da BEA representando a Jurema-preta (*Mimosa tenuiflora* (Willd.) Poir) associada ao Neossolo Litólico. (COSTA, 2012).

Investigações científicas com enfoque na parcela na zona das raízes evidenciam que a vegetação apresenta traços de adaptação intranual no sistema radicular, o que altera a análise hidrológica temporal do bioma. Foi ratificado ainda o aumento da macroporosidade e condutividade hidráulica do solo com a diminuição do volume do sistema radicular da vegetação; redução abrupta do escoamento superficial para eventos de precipitação isolados no período seco e nas primeiras chuvas do período chuvoso pela redução do volume do sistema radicular (COSTA *et al.*, 2013; PINHEIRO *et al.*, 2013).

### 3.1.3 Regime hidrológico

De acordo com a classificação climática de Köppen-Geiger, o clima é BSh (semiárido quente), com média anual no Tanque Classe A de 2500 mm. A precipitação média anual é de 650 mm, com prevalência de chuvas de janeiro a maio. A temperatura média mensal varia de 24 a 28°C. (ARAÚJO; PIEDRA, 2009; PINHEIRO *et al.*, 2016).

Na BEA, o mês mais úmido é janeiro (média de 175 mm), o mais seco setembro (média de 0,3 mm); o número de dias chuvosos por ano, em média, é 81 e o tempo de concentração é de 65 min. (ARAÚJO; PIEDRA, 2009).

A região possui curvas IDF (intensidade-duração-frequência) para diferentes períodos de retorno. As curvas foram desenvolvidas utilizando 14 anos de monitoramento contínuo (2003 a 2016) da precipitação (RODRIGUES; ARAÚJO, 2017).

Há baixa produção de sedimentos na bacia (24 ton km<sup>-2</sup> ano<sup>-1</sup>), fortemente influenciada pelo escasso escoamento superficial. Tal situação limita a capacidade de transporte e aumenta a deposição, reduzindo a conectividade de sedimentos (MEDEIROS *et al.*, 2010; MEDEIROS *et al.*, 2014).

Pinheiro *et al.* (2016) asseveram que as variáveis hídricas como precipitação anual, perdas por interceptação, evapotranspiração real não diferem estatisticamente entre as ASV independentemente da diferença na parametrização do solo e da vegetação, portanto, a BEA foi considerada como uniforme ao serem escolhidos os parâmetros do método SCS/CN.

### 3.2 Dados de precipitação e escoamento

Foram utilizados todos os eventos (42) de precipitação na BEA, nos quais foi observado escoamento superficial acima de 0,10 mm no período de 2005 a 2014. Esse valor de tolerância (0,10 mm) foi adotado utilizando-se a metodologia aplicada por Figueiredo *et al.* (2016). A estimativa do escoamento é realizada pelo balanço hídrico (Equação 8) do reservatório Boqueirão (59 600 m<sup>3</sup>), localizado no exutório da bacia hidrográfica (BEA). O volume do reservatório pode ser avaliado através de suas curvas nível-área e nível-volume (para mais detalhes, ver LIMA, 2010). O nível d'água é monitorado por meio de linígrafo automático (medidas horárias) e por régua linimétrica (medidas diárias).

$$\Delta V/\Delta t = (Q_R + Q_G + Q_H) - (Q_U + Q_I + Q_E + Q_S) \quad (8)$$

em que,  $t$  é tempo,  $V$  é o volume armazenado no reservatório e  $Q$  são as vazões que cruzam os limites do reservatório. Os índices referem-se à natureza de vazão:  $R$  refere-se ao escoamento que entra no reservatório;  $G$  ao aporte de águas subterrâneas;  $H$  à precipitação direta sobre o lago;  $U$  ao uso da água (retiradas);  $I$  à infiltração;  $E$  à evaporação; e  $S$  à saída através do vertedouro.

A vazão  $Q_G$  é considerada insignificante na BEA;  $Q_H$  é a taxa de precipitação multiplicada pela área inundada;  $Q_U$  foi avaliada em 1 m<sup>3</sup> dia<sup>-1</sup> (FIGUEIREDO *et al.*, 2016);  $Q_I$  é avaliada como 30% da taxa de evaporação do tanque classe A (MAMEDE *et al.*, 2012) multiplicado pela área inundada;  $Q_E$  é avaliada pela taxa de evaporação do tanque classe A multiplicada pelo fator de correção (para regiões semiáridas 0,70: MAMEDE *et al.*, 2012) e pela área inundada. Durante o período de análise, nenhum vertimento foi observado ( $Q_S = 0$ ).



### 3.3 Avaliação dos parâmetros CN e $\lambda$

O método CN compreende uma equação do balanço hídrico e duas hipóteses fundamentais (SCS, 1972). A primeira hipótese equivale à razão entre a quantidade de escoamento superficial direto ( $P_e$ ) e o escoamento superficial potencial máximo ( $P - I_a$ ) com a razão entre a quantidade de infiltração ( $F$ ) e o potencial de máxima retenção ( $S$ ). A segunda hipótese relaciona as abstrações iniciais ( $I_a$ ) com a retenção máxima. Assim, o método CN consiste nas Equações 2 - 4:

$$P = I_a + F + P_e \quad (9)$$

$$\frac{P_e}{P - I_a} = \frac{F}{S} \quad (10)$$

$$I_a = \lambda \cdot S \quad (11)$$

em que  $P$  = precipitação (mm);  $I_a$  = abstrações iniciais (mm);  $F$  = infiltração cumulativa após o início do escoamento (mm);  $P_e$  = lâmina de escoamento (mm);  $S$  = potencial de retenção máxima do bacias hidrográficas após o início do escoamento, mm; e  $\lambda$  = taxa de abstração inicial, adimensional.

O valor padrão de  $\lambda$  é 0,20 (SCS 1972). As abstrações iniciais consistem na evaporação, interceptação do dossel e armazenamento de superfície do solo, bem como a infiltração cumulativa antes do início do escoamento (PONCE; HAWKINS, 1996). Combinando as Equações 2 e 3, a lâmina de escoamento é dada por:

$$P_e = \frac{(P - I_a)^2}{P - I_a + S} \quad (12)$$

A Equação 12 é válida para  $P > I_a$ , caso contrário,  $P_e = 0$ .

O parâmetro  $S$ , que representa o potencial de armazenamento da bacia (mm), é definido pela Equação 13

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (13)$$

em que  $CN$  = número da curva, determinado pelas características da bacia hidrográfica, incluindo solos, uso da terra e condições hidrológicas. Ressalta-se que os resultados de

calibração dos parâmetros  $\lambda$  e S para a Bacia Experimental de Aiuaba, a serem obtidos no âmbito desse trabalho, serão comparados com aqueles utilizando os parâmetros do método original (SCS, 1972, Tabela 3; NEH-4, ver seção 2.6 deste trabalho e Anexo B).

Tabela 3 - Classificação da Bacia Experimental de Aiuaba de acordo com os parâmetros do National Engineering Handbook, seção 4

Tipo de cobertura/uso do solo	Condição hidrológica	GHS	CN
Floresta/bosque	Boa	A	30

Fonte: NEH4 - SCS (1972)

A análise de incertezas dos parâmetros do modelo SCS/CN foi feita por meio de três distintas abordagens.

### 3.3.1 Abordagem I: análise combinatória em pares de eventos de precipitação

A análise combinatória dos 42 eventos em dois pares ( $C_{42}^2$ , quarenta e dois eventos, dois a dois) totalizou 861 combinações. A Abordagem I teve por objetivo calibrar valores de CN admitindo-se  $\lambda = 0,20$  (valor original do método SCS/CN) para cada combinação de eventos. A função objetivo usada na calibração (uma medida de erro absoluto médio) considerou tanto a lâmina escoada observada ( $Pe_o$ ) quanto a calculada ( $Pe_c$ ). Essa função objetivo foi escolhida para evitar que a calibração gerasse um excessivo número de eventos com escoamento zero. A calibração foi feita por meio da ferramenta *Solver* do software Microsoft Excel®, utilizando o método do Gradiente Reduzido Generalizado (GRG não-linear, ABADIE e CARPENTER, 1969) para cada par de eventos. Este procedimento gerou valores de CN para cada par de eventos e a função objetivo, calibrada para atingir o mínimo erro possível, é apresentada na Equação 14.

$$\bar{e} = \left( \frac{\text{máx} \left| \frac{Pe_{o1} - Pe_{c1}}{Pe_{o1}} \right| ; \left| \frac{Pe_{o1} - Pe_{c1}}{Pe_{c1}} \right| + \text{máx} \left| \frac{Pe_{o2} - Pe_{c2}}{Pe_{o2}} \right| ; \left| \frac{Pe_{o2} - Pe_{c2}}{Pe_{c2}} \right|}{2} \right) \quad (14)$$

A essa equação chamou-se de *medida de erro médio dos erros absolutos máximos*. O intuito desse procedimento foi diminuir a punição dada às estimativas de erro quando estes mostravam elevada disparidade entre dados observados e dados calculados.

### 3.3.2 Abordagem II: gráfico de superfície e combinações entre CN e $\lambda$

Com objetivo de avaliar simultaneamente os parâmetros, a segunda abordagem foi feita com todos os valores possíveis para  $0 < CN < 100$  e  $0,0001 < \lambda < 0,20$  e utilizou-se como medidas de erro e/ou eficiência o coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE, Equação 15, NASH; SUTCLIFFE, 1970) e Raiz do Erro Médio Quadrático (RMSE, Equação 16)

Em seguida, fez-se a comparação entre a melhor combinação entre valores obtidos e valores observados com auxílio do coeficiente de Correlação de Pearson (R). Para cada um destes pares CN/ $\lambda$  com maior valor de R o NSE e o RMSE foram calculados.

Os produtos dessa abordagem foram dois tipos de gráficos de superfície. No primeiro tipo, os eixos são: (i) primeiro eixo horizontal – parâmetro CN; (ii) segundo eixo horizontal – parâmetro  $\lambda$ ; (iii) eixo vertical – medida de erro RMSE. No segundo tipo, os eixos são: (i) primeiro eixo horizontal – parâmetro CN; (ii) segundo eixo horizontal – parâmetro  $\lambda$ ; (iii) eixo vertical – medida de eficiência NSE, que é definida como,

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{cal})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y^{méd})^2} \quad (15)$$

em que  $Y_i^{obs}$  é o parâmetro observado,  $Y_i^{cal}$  refere-se ao parâmetro calculado,  $Y^{méd}$  é o valor médio dos parâmetros observados, e n é o total de observações. O coeficiente NSE varia de  $-\infty$  a 1, com  $NSE = 1$  sendo o valor ótimo. Valores entre 0 e 1 são geralmente vistos como aceitáveis, enquanto valores menores que zero indicam que a média das observações é melhor preditor do que o modelo que gerou as simulações, o que indica performance inaceitável.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{cal})^2}{n}} \quad (16)$$

O valor de erro RMSE (Equação 16) = 0 indica um ajuste perfeito.

### 3.3.3 Abordagem III: avaliação dos parâmetros por evento

Levando em consideração que  $\lambda$  e CN são parâmetros que variam de evento para evento (LING; YUSOP, 2014; SOULIS; VALIANTZAS, 2012), esta abordagem foi realizada sem combinações, isto é, analisando cada evento chuvoso. Utilizaram-se como função objetivo quatro medidas de erro e/ou eficiência: NSE, Equação 15; RMSE, Equação 16; PBIAS, Equação 17; e Razão do Desvio Padrão de Observações do RMSE – RSR, Equação 18.

$$\text{PBIAS} = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{\text{obs}} - Y_i^{\text{cal}})}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{\text{obs}})} \right] \quad (17)$$

em que PBIAS é o desvio dos dados a serem avaliados, expresso em porcentagem. Mede a tendência média dos dados calculados a serem maiores ou menores que aqueles observados (GUPTA; SOROOSHIAN; YAPO, 1999; MORIASI *et al.*, 2007).

$$\text{RSR} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{\text{obs}} - Y_i^{\text{cal}})^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{\text{obs}} - Y_i^{\text{méd}})^2}} \quad (18)$$

Baseado na recomendação de Singh *et al.* (2004), foi desenvolvido o RSR, que padroniza o RMSE usando o desvio padrão das observações e combina um índice de erro. O RSR é, portanto, a razão entre o RMSE e o desvio padrão dos dados medidos, como mostrado na Equação 18.

Sabe-se que o CN pode ser obtido de tabelas para vários tipos de solo, cobertura e condições de manejo, contudo o CN estimado com base em dados reais de chuva e escoamento da própria bacia ou de regiões próximas é preferível (HAWKINS, 1979). Assim, tanto CN quanto o potencial máximo de retenção do solo (S) foram obtidos por meio das Equações 19 e 20, amplamente utilizadas quando existem dados de chuva e escoamento para a área de interesse (ver, por exemplo, Chen, 1982; Soulis e Valiantzas, 2012).

$$\text{CN} = \frac{25400}{\frac{P}{\lambda} + \frac{(1-\lambda)Pe - \sqrt{(1-\lambda)^2 Pe^2 + 4\lambda P \cdot Pe}}{2\lambda^2} + 254} \quad (19)$$

$$S = \frac{P}{\lambda} + \frac{(1 - \lambda) Pe - \sqrt{(1 - \lambda)^2 Pe^2 + 4\lambda P \cdot Pe}}{2\lambda^2} \quad (20)$$

Nas Equações 19 e 20, P é a precipitação (mm) e Pe o escoamento superficial (mm).

### 3.4 Simulações de eventos de escoamento

As simulações realizadas para avaliar as incertezas presentes no modelo SCS/CN foram feitas por meio da análise do histograma de respostas gerado pelas combinações de eventos anteriormente descritas.

Sabe-se que, para gerar uma sequência de valores, a distribuição de probabilidade deve ser especificada. Os dados históricos e a compreensão dos processos físicos são utilizados para selecionar as distribuições apropriadas e para estimar seus parâmetros. Neste caso, com auxílio do software Minitab® foram testadas e analisadas algumas funções de distribuição de probabilidade, a saber: Gaussiana (Normal), Log-Normal, Exponencial, Weibull de três parâmetros (doravante será referida como Weibull-3), Gama de três parâmetros (doravante Gama 3). A função densidade de probabilidade foi escolhida após análise gráfica e estatística descritiva, em que o teste de ajuste de Anderson-Darling foi adotado.

Para simular o escoamento superficial, uma série sintética foi gerada (10.000 eventos de escoamento para cada evento de precipitação). Essa metodologia já foi realizada com êxito para avaliações hidrológicas de ambientes semiáridos (por exemplo, ARAÚJO; PIEDRA, 2009; FARIAS, 2003). A série foi estocasticamente gerada usando a Equação de Ven Te Chow (Equação 21), cujos parâmetros são média ( $\mu$ ) e desvio padrão ( $\sigma$ ) da série medida da variável. Nesse caso, a variável corresponde ao CN. A variável estocástica k foi calculada, para cada simulação (t), usando-se uma semente aleatória entre zero e um, interpretada como a probabilidade de ocorrência do evento. A variável k foi calculada, então, como o valor independente (eixo das abscissas) para o qual a integral da função densidade correspondia à probabilidade (semente aleatória).

$$CN_{sim} = \mu + k(t) \cdot \sigma \quad (21)$$

Para cada evento de precipitação utilizado foi atribuído o valor um (=sucesso) quando o escoamento observado estava inserido na faixa de respostas decorrente do método de Monte Carlo; ou zero, em caso contrário. A razão de acerto (RA) é dada pela razão entre o número de acertos (eventos associados ao valor um) e o número total de eventos.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Avaliação dos parâmetros CN e $\lambda$

#### 4.1.1 Abordagem I: combinação em pares de eventos de precipitação

No histograma de respostas do CN observa-se o resultado das 861 combinações de eventos (Figura 7). É notável um comportamento bimodal para a calibração feita ao fixar o valor de  $\lambda$ . Apesar de não ser tão próximo ao ideal de ajuste (ver estatística descritiva a seguir, Tabela 4), a distribuição que melhor se ajustou ao conjunto de dados foi a Gama-3.

Figura 7 - Histograma de respostas de CN para  $\lambda = 0,20$  após análise combinatória. A linha tracejada indica a divisão das regiões de picos.

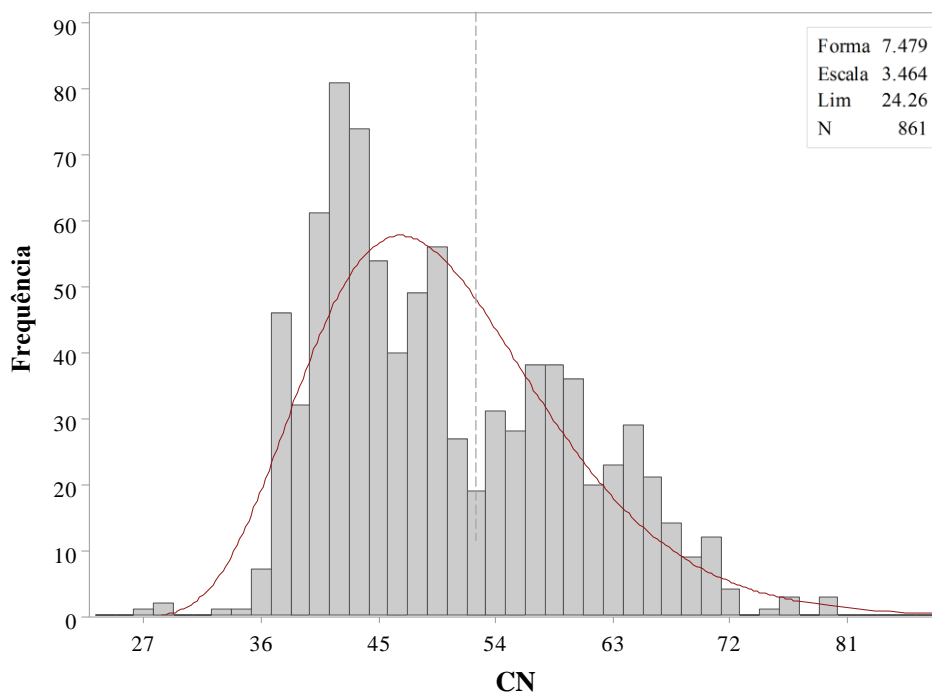


Tabela 4 – Estatística descritiva para a o histograma de respostas de CN para  $\lambda = 0,20$  após análise combinatória

$\overline{\text{CN}}$	$\text{CN}_{\text{median}}$	$\text{CN}_{\text{mín}}$	$\text{CN}_{\text{máx}}$	Desvio Padrão	$\overline{\text{err}}$
50,2	48,2	27,6	79,6	9,49	0,45

A maior medida de erro registrada foi a relativa à combinação dos eventos 77,79 mm (escoamento 0,16 mm) e 15,74 (escoamento 0,13 mm). Justifica-se isso, entre outros motivos, por meio da observação da precipitação ocorrida nos cinco dias anteriores a cada

evento deste. No primeiro, maior em termos de precipitação, esperava-se mais escoamento. O evento ocorreu no dia 5/12/2005 ( $P5 = 1,01$  mm), isto é, pré-estação chuvosa da região. O solo ainda estava em condições secas, com macroporos possivelmente ainda abertos, e proporcionou abstrações iniciais grandes o suficiente para promover pouco escoamento quando relacionado ao segundo evento, de 19/04/2007 ( $P5 = 74,83$  mm). Este, em período final da estação chuvosa, já apresentava solo bastante úmido e propenso a escoamento superficial, sob a hipótese de que os macroporos estivessem fechados.

Macroporos são definidos como poros relativamente grandes no solo que podem formar importantes vias de infiltração e redistribuição de água, tornando-se fluxo preferencial. Podem resultar de rachaduras no solo ("soil cracking", SANTOS *et al.*, 2016), formação de canais radiculares (PINHEIRO *et al.*, 2013) ou até mesmo de microfauna presente no solo (VAN SCHAİK *et al.*, 2014).

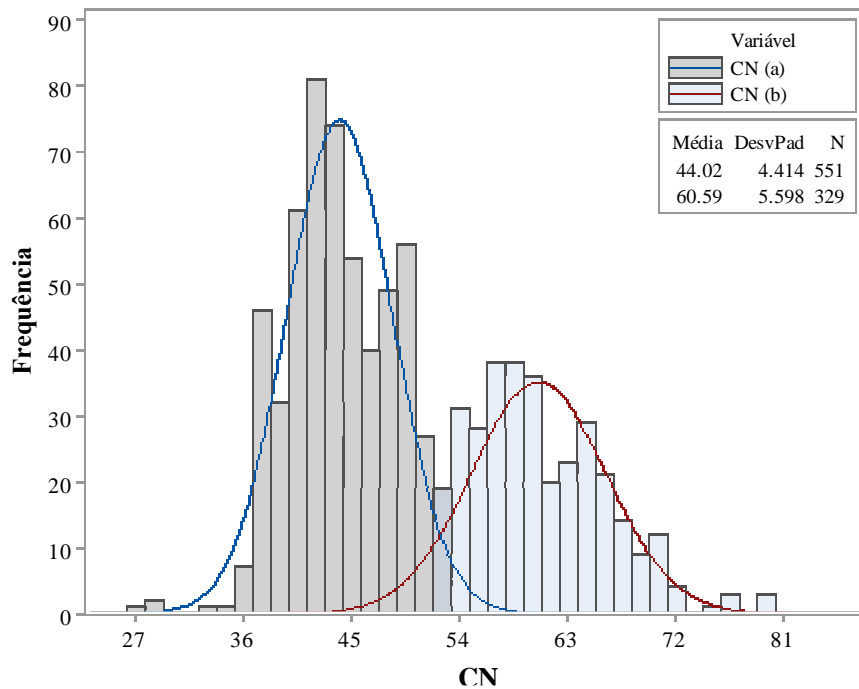
Em uma bacia experimental localizada em região semiárida da Espanha, Van Schaik *et al.* (2008; 2014) evidenciaram a presença de uma grande rede de macroporos, que pode transportar água lateralmente, independentemente do teor de umidade do solo. Os resultados de ambas as pesquisas provaram que o fluxo em macroporos desempenha um papel fundamental a nível de bacia hidrográfica. Como tais fluxos são processos determinantes naquela região, os autores concluíram que é necessária inclusão deste fator na modelagem hidrológica.

Às distintas regiões dos histogramas foram atribuídas nomenclaturas (CNa e CNb) com o intuito de avaliar de maneira mais minuciosa o comportamento bimodal das respostas (Figura 8). Como elucidado por Figueiredo *et al.* (2016), é possível que o início do fluxo de escoamento superficial no bioma Caatinga seja fortemente influenciado pela dinâmica do sistema radicular (Pinheiro *et al.*, 2013), que altera o estado de macroporosidade e, portanto, as abstrações iniciais do processo. Supõe-se, com base nisto, que a região CNa, aquela com valores menores de CN, seja característica de macroporos abertos, que facilitam a infiltração da água devido ao movimento das raízes no período seco que contribui seguramente na porosidade do solo. A região CNb, que apresenta maiores valores, tem característica de macroporos fechados, o que favorece o escoamento superficial. Os resultados apresentados por Pinheiro *et al.* (2013) e Figueiredo *et al.* (2016) na BEA embasam este raciocínio. De acordo com esses autores, uma possível explicação pode ser a de que as abstrações iniciais mudam sazonalmente em função do comportamento dinâmico (expansão e contração) do sistema radicular no bioma Caatinga, potencializando o fluxo de macroporos.

Ao realizar o teste de identificação da distribuição dos dados avaliados, as

distribuições Weibull-3 e Normal explicam, cada uma, uma região no histograma (Figura 8), isto é, os dados se ajustam melhor à distribuição Normal nas regiões CNa e Weibull triparmétrica em CNb.

Figura 8 - Histograma de respostas de CN com destaque das regiões CNa e CNb.



Os gráficos a seguir (Figura 9) ilustram com intervalo de confiança de 95% a distribuição de probabilidade dos dados para três distribuições que melhor se adequaram (Gama-3, Weibull-3 e Normal) e uma que ilustra o que seria péssimo ajuste (Exponencial). A Tabela 5 apresenta informações estatísticas da distribuição para cada região de CN.

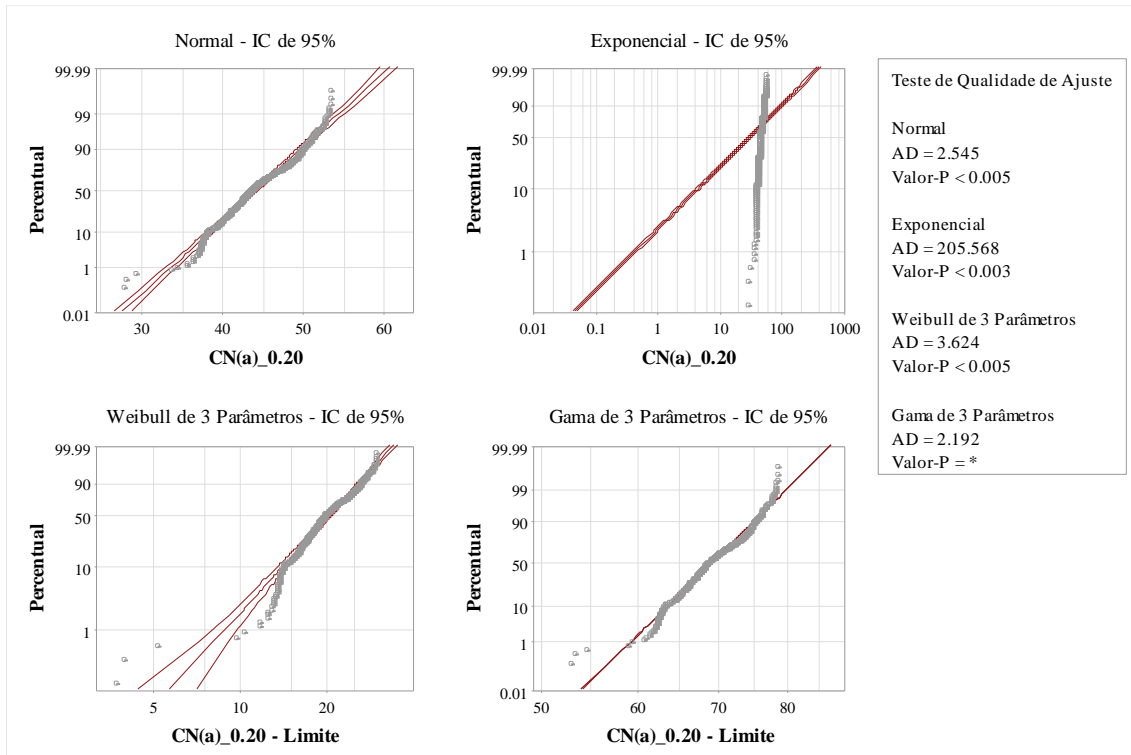
Tabela 5 - Estatística descritiva para ambas as regiões do histograma de respostas (CNa e CNb)

CNa							
n	Média	DesvPad	Mediana	Mínimo	Máximo	Assimetria	Curtose
551	44,0	4,4135	43,5	27,5	53,2	-0.0834694	-0.160822
CNb							
329	60,5	5,5981	59,5	51,9	79,5	0.734016	0.318645

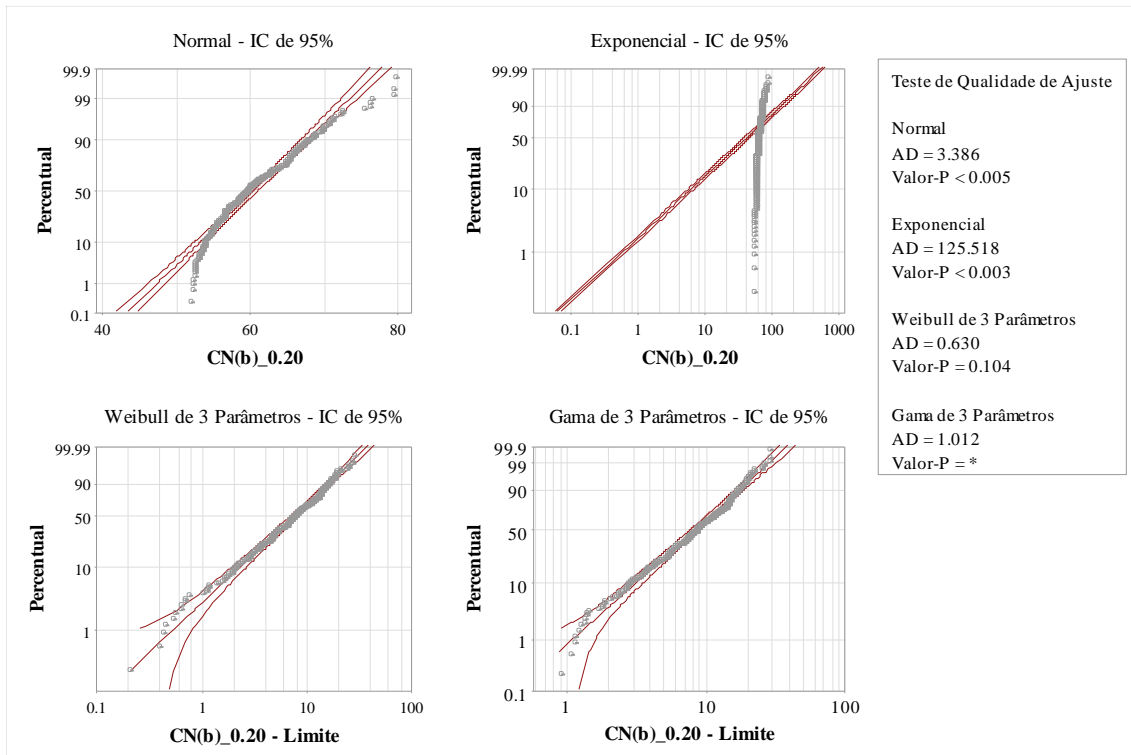


Figura 9 - Gráfico de Probabilidade para região CNa (a) e CNb (b) para  $\lambda = 0,20$

(a)



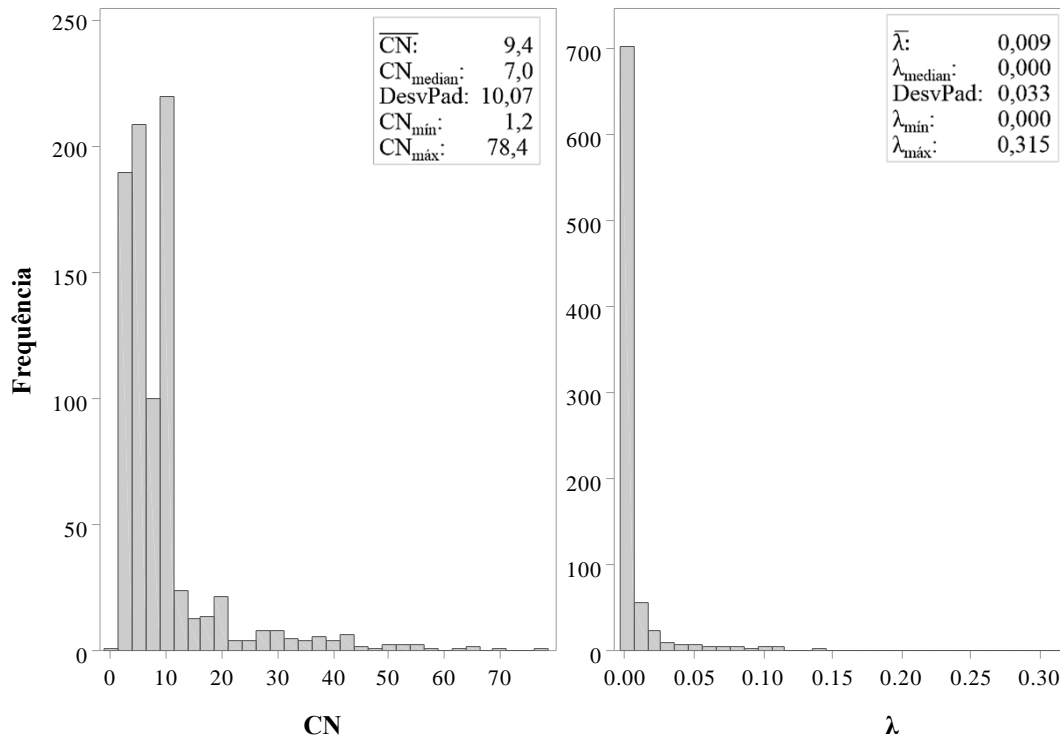
(b)



Obs.: O asterisco ao lado do coeficiente de Anderson-Darling na função Gama 3 indica que o algoritmo de Newton-Raphson não convergiu depois de 100 iterações e que a convergência não foi alcançada para os critérios de estimativas dos parâmetros.

Quando analisada a resposta dos parâmetros simultaneamente (Figura 10), o comportamento bimodal não é tão explícito. Contudo, destaca-se outro ponto notável: o fato de ambos os parâmetros tenderem a valores próximos a zero.

Figura 10 - Histograma de respostas de CN e  $\lambda$  calibrados simultaneamente após análise combinatória.



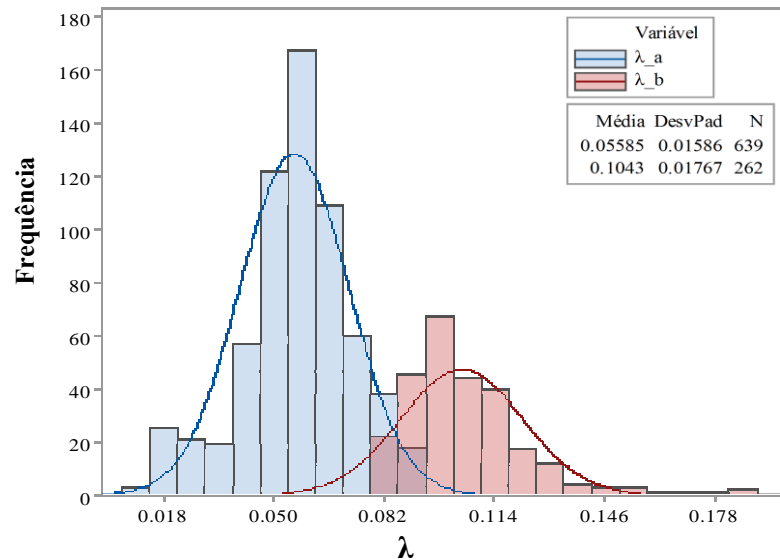
Vê-se no histograma de CN que cerca de 80% dos dados estão entre 1 e 10, e no histograma de  $\lambda$  aproximadamente 90% dos dados estão entre 0 e 0,005. A justificativa para tal resultado reside no baixíssimo escoamento superficial observado na BEA, na casa dos 0,5% por evento (ARAÚJO; PIEDRA, 2009; FIGUEIREDO *et al.*, 2016). Por exemplo, nos dez anos de observação dos dados utilizados neste trabalho, nenhum escoamento superou 2,16 mm (nesse evento, o percentual de escoamento foi de apenas 2,61%).

Já o parâmetro  $\lambda$  nessa abordagem é ainda menor do que aquele sugerido por Woodward *et al.* (2003), de 0,05 e equivalente ao encontrado em outras investigações feitas pelo mundo em regiões de ambiente semiárido ou não (LING; YUSOP, 2014).

Ao analisar o histograma resultante da análise combinatória dos eventos com CN igual a 30 (valor segundo o NEH-4 para as condições hidrológicas e de uso do solo na BEA) duas regiões são mais pronunciadas no gráfico (Figura 11), com maior frequência de ocorrência nas redondezas de 0,05. Destaca-se também o fato de que todos os valores encontrados estão

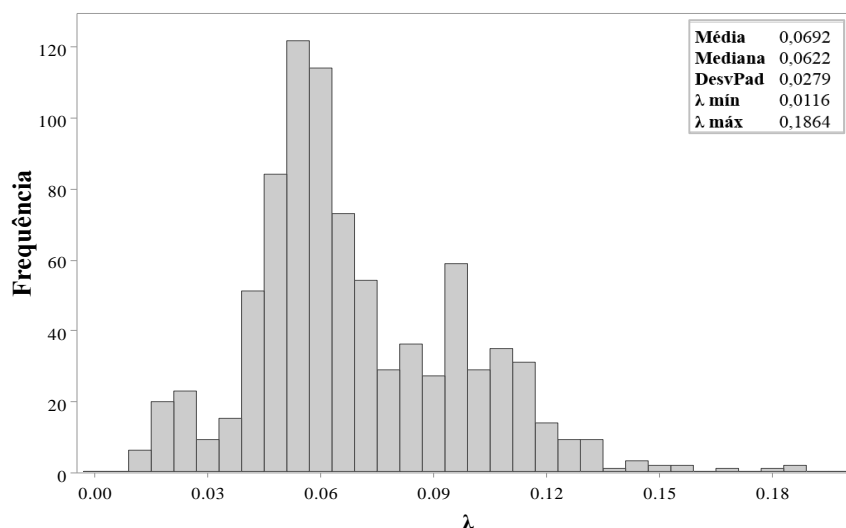
abaixo de 0,20. De fato, a relação Ia/S já foi discutida em diversas investigações científicas (HAWKINS, 1984; VAN MULLEN, 1991; TEDELA *et al.*, 2012; YU, 2012), as quais apresentam dados quase sempre menores do que o proposto originalmente pelo SCS.

Figura 11 - Histograma de respostas de  $\lambda$  para CN igual a 30 para os eventos da BEA (2005 – 2014).



Ling e Yusop (2014), em um trabalho de revisão e investigação da relação Ia/S (ou seja,  $\lambda$ ) em diversas partes do mundo, mostraram que o valor mínimo relatado foi zero, o máximo foi 0,864 e 0,05 foi o mais comum. Estes resultados divergiram do pressuposto inicial do SCS de que  $\lambda = 0,20$  e evidenciaram que esta relação geralmente superestima o escoamento superficial. Os autores observaram ainda que a amplitude dos dados de  $\lambda$  é maior nas regiões tropicais, o que está de acordo com o resultado desta abordagem (variação de 0,00 a 0,315).

Figura 12 - Histograma de respostas de  $\lambda$  para CN igual a 30 segundo o que preconiza o NEH-4 para os eventos da BEA (2005 – 2014).



Todavia, apesar de estar localizada em região tipicamente semiárida, a BEA possui escoamento superficial atípico do observado em regiões de clima e hidrologia semelhantes (WHEATER; SOROOSHIAN; SHARMA, 2008). Uma forte hipótese é a de que uma insólita combinação entre os fatores vegetação e geologia contribuem para este comportamento na Bacia Experimental de Aiuaba.

No que se refere às características geológicas, retoma-se aqui que na bacia há formações de complexo cristalino e também sedimentar (COSTA, 2012; PINHEIRO *et al.*, 2016), com presença de gnaisses de textura fina a média, rochas metassedimentares e mármore dolomíticos. De fato, Kovacs (1993) afirma que altas vazões são determinadas pelo clima, enquanto baixas vazões, como as observadas na BEA, são dominadas pela geologia.

Como previamente mencionado, a bacia está inteiramente inserida em área de preservação ambiental, com vegetação de Caatinga preservada há cerca de 40 anos. Dito isto, ressalta-se que a vegetação da Caatinga, apesar de possuir adaptações morfológicas e fisiológicas de resistência à estiagem (NOGUEIRA; SILVA, 2002; SILVA *et al.*, 2004), é vulnerável; a vegetação é facilmente destruída e exige um longo período de recuperação, medido em anos ou mesmo dezenas de anos (ALMEIDA *et al.*, 2017). A vegetação pode ser reduzida ou destruída pela atividade humana, sobrepastejo ou longos períodos de estiagem (PILGRIM; CHAPMAN; DORAN, 1988).

Ao utilizar dados de experimentos de escoamento em múltiplas escalas e locais (Austrália, América do Norte e Europa), bem como de dados da literatura, Ludwig *et al.* (2005) documentaram que fragmentos de vegetação em savanas semiáridas e matas arbustivas

armazenam mais água do que outras áreas, até mesmo de transição. Outros experimentos nessas paisagens ilustraram que estes fragmentos que retinham mais água tinham pulsos maiores de crescimento de plantas, portanto, produção de biomassa, e capacidade de infiltração do que as áreas abertas. Algo semelhante ao comportamento caducifólio da vegetação do bioma Caatinga.

Ludwig *et al.* (2005) enfatizam que, embora essas descobertas possam parecer intuitivamente lógicas e, portanto, não surpreendentes, sua importância e extensão muitas vezes não são totalmente apreciadas, porém suportam a hipótese de que fortes interações ocorrem nos chamados processos ecohidrológicos em muitas paisagens semiáridas, bem como acontece na BEA.

#### ***4.1.2 Abordagem II: gráfico de superfície e combinações entre CN e $\lambda$***

Percebe-se que após calculados todos os valores possíveis para  $0 < CN < 100$ , e  $0,0001 < \lambda$  ambas as medidas utilizadas para avaliar o método (NSE e RMSE) indicaram a mesma tendência para cada parâmetro: um valor muito mais baixo do que o recomendado pela literatura (Figuras 13 e 14) e um pior ajuste conforme os parâmetros vão aumentando. A análise aqui feita assevera que os números ótimos para este conjunto de dados são  $CN = 2,7$  e  $\lambda = 0,0001$ . RMSE e NSE apresentaram, para este par de parâmetros, 0,015 e 0,62, respectivamente. Segundo Moriasi *et al.* (2007), isso indica satisfatória relação entre dados observados e calculados se tratando de modelos hidrológicos.

Figura 13 - Gráfico de contorno de CN,  $\lambda$  e coeficiente de Nash-Sutcliffe (NSE) para eventos da Bacia Experimental de Aiuaba (BEA) de 2005 a 2014.

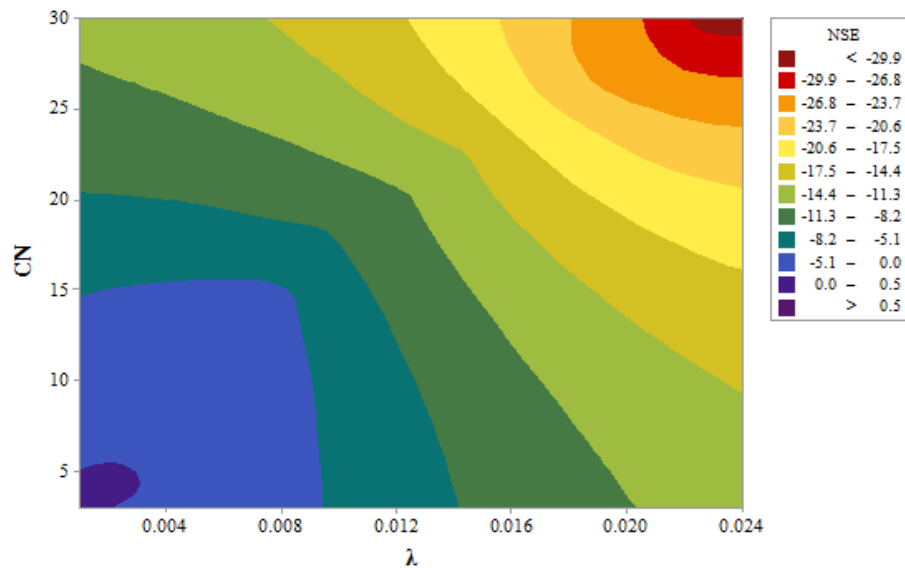
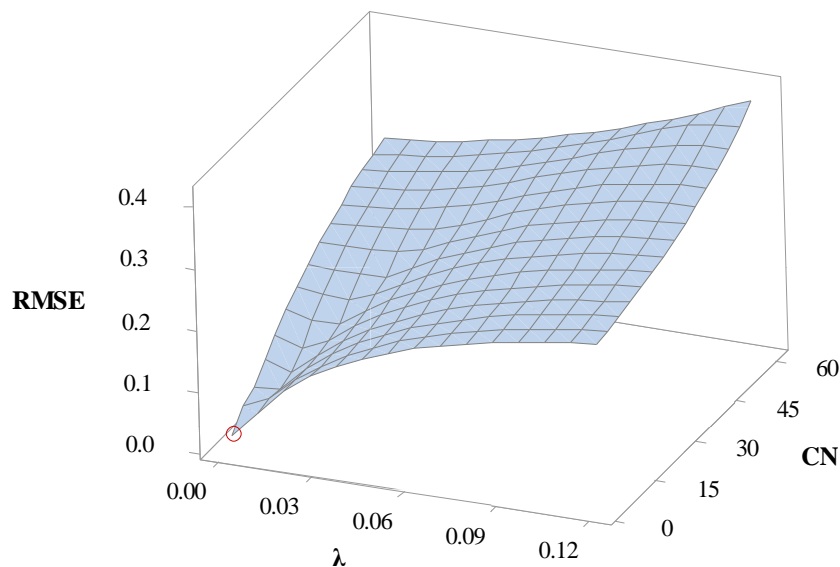


Figura 14 - Gráfico de superfície de CN,  $\lambda$  e medida de erro RMSE para eventos da Bacia Experimental de Aiuaba (BEA) de 2005 a 2014. No círculo vermelho identifica-se o ponto ótimo.



É importante salientar que esse resultado é o melhor matematicamente, pois, como elucidado na seção anterior, um comportamento atípico é observado nessa região em termos de escoamento superficial. Entretanto, os valores de CN e de  $\lambda$  não são plausíveis do ponto de vista da representação do sistema físico. Isso fica também evidente quando se observa o valor de S (potencial máximo de retenção do solo). Para os valores ótimos ( $CN^* = 3$  e  $\lambda^* = 0,0001$ ), o parâmetro S da Bacia de Aiuaba seria superior a 9 m, o que não procede absolutamente, quando

comparado com os dados fisiográficos. Números dessa magnitude não são razoáveis em um solo de região semiárida, notadamente raso e em embasamento cristalino, como acontece em parte da BEA, na qual a profundidade média do solo é inferior a 0,50 m (COSTA, 2012).

Os coeficientes de escoamento de eventos da estação chuvosa (janeiro a abril) não são necessariamente mais altos do que aqueles no período seco ou pré-estação (maio a dezembro). Isso pode ser atribuído ao maior potencial de evaporação no período seco (cerca de 2100 mm, de acordo com ARAÚJO; PIEDRA, 2009), o que contribui para a redução da umidade do solo e, conseqüentemente, para maiores abstrações iniciais durante as precipitações.

Os resultados também mostram que o estado seco do solo por si só não explica a diferença do comportamento de escoamento estimados entre as duas estações. Como observado em investigação feita por Tian, Li e Sivapalan (2012), isso pode ser indicativo de que processos adicionais de abstração podem estar ativos. Os autores relataram três outros processos de abstração são levantados como explicações potenciais e que naturalmente podem ser atribuídos à BEA, a saber, depressões superficiais (microtopografia), interceptação do dossel vegetal e fissuração do solo.

Em outras palavras, apesar de fornecer uma combinação de parâmetros que resulte em boa correlação de dados observados e calculados, o modelo SCS/CN parece não se aplicar aos processos hidrológicos da Bacia Experimental de Aiuaba por fugirem da realidade física da região.

Buscando analisar os dados de maneira semelhante à terceira abordagem, os valores de CN e  $\lambda$  aqui obtidos foram aplicados a cada evento de precipitação e escoamento e serão descritos a seguir neste trabalho.

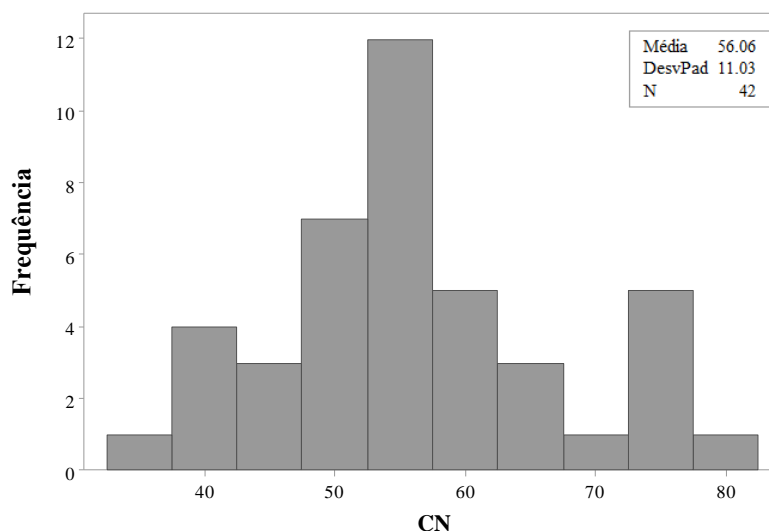
#### ***4.1.3 Abordagem III: avaliação dos parâmetros por evento***

De acordo com esta abordagem, o CN médio por evento é 56,0 e a mediana 55,4. Este resultado é maior do que o encontrado por Costa (2007) para a BEA, CN = 42, e que o sugerido pela tabela do NEH-4, CN = 30. A diferença deste resultado para aquele obtido por Costa (2007) pode ser explicada pela quantidade amostral à época, com apenas cinco anos de dados observados.

Um comportamento notável no histograma de CN é visto na Figura 15, em que uma resposta bimodal semelhante àquela vista no histograma da análise combinatória que gerou 861 valores. Isso pode confirmar a hipótese que a distribuição do parâmetro CN é bimodal. Portanto,

as abstrações iniciais, influenciadas pela dinâmica das raízes no solo, contribuem significativamente para as incertezas na modelagem hidrológica desta bacia. Porém, é importante destacar ainda o papel fundamental da microtopografia nos processos hidrossedimentológicos de dada região.

Figura 15 - Histograma de respostas do parâmetro CN para os eventos da BEA (2005 – 2014). A calibração foi realizada evento a evento, sem combinações. Admitiu-se  $\lambda = 0,20$ .



Em escala local, a microtopografia produz padrões de escoamento não uniformes, segregando o fluxo em zonas estreitas, relativamente profundas e de fluxo rápido (CHEN, 2013). Estimativas feitas por Thompson *et al.* (2010) mostraram que, com os efeitos de declive e depressões locais, a microtopografia pode aumentar a infiltração de chuva em mais de 20%, comparada com o caso de terrenos planos, no qual a microtopografia é (quase) ausente.

Apesar de a microtopografia ter sido incluída em estudos de modelagem com o objetivo de investigar seu impacto geral no escoamento superficial (TAYFUR *et al.*, 1993; HELMERS; EISENHAUER, 2006; APPELS *et al.*, 2011), seu impacto na variabilidade espacial do processo chuva-escoamento requer mais investigações.

Buscou-se ainda, com embasamento nos resultados da abordagem anterior, simular o escoamento para cada evento de chuva utilizando os valores ótimos evidenciados na Figura 14 (gráfico de superfície). Vê-se na Tabela 6 que, de fato, os valores simulados se aproximam dos valores observados na BEA para  $CN^* = 3$  e  $\lambda^* = 0,0001$ . Contudo, ressalta-se novamente que o potencial máximo de retenção (S) ultrapassa 9 m, evidenciando o caráter controverso do ponto de vista físico. Apesar do bom desempenho, o modelo SCS/CN, com os parâmetros acima mencionados, não obteve desempenho satisfatório para o coeficiente de NS, usando-se o critério



de classificação de Moriasi *et al.* (2007). O gráfico de dispersão da Figura 16 ilustra essa correlação ainda relativamente fraca.

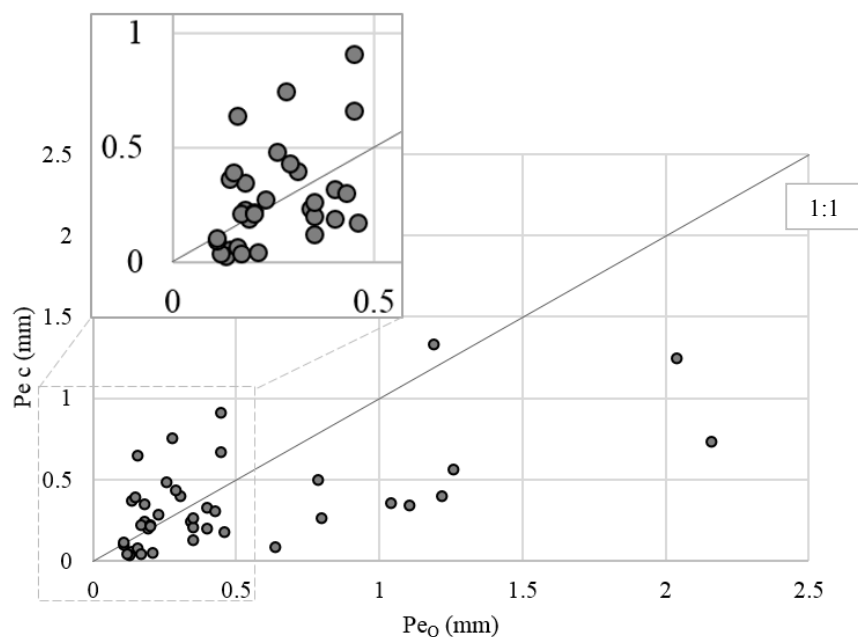
Tabela 6 - Escoamento superficial calculado para  $\lambda = 0,0001$  e  $CN = 3$ . P = precipitação (mm);  $Pe_o$  = Precipitação efetiva observada (mm);  $Pe_c$  = Precipitação efetiva calculada (mm); S = potencial máximo de retenção do solo (mm);  $Ia$  = abstrações iniciais (mm)

<b>N</b>	<b>Date</b>	<b>P (mm)</b>	<b><math>Pe_o</math> (mm)</b>	<b>S (mm)</b>	<b><math>Ia</math> (mm)</b>	<b><math>Pe_c</math> (mm)</b>
1	15/01/2005	92.65	0.45	9153.4	0.92	0.91
2	20/01/2005	82.77	2.16	9153.4	0.92	0.73
3	26/01/2005	49.70	0.80	9153.4	0.92	0.26
4	15/02/2005	57.32	0.18	9153.4	0.92	0.35
5	05/12/2005	77.79	0.16	9153.4	0.92	0.64
6	06/02/2006	22.81	0.14	9153.4	0.92	0.05
7	09/04/2006	55.12	0.40	9153.4	0.92	0.32
8	01/05/2006	79.10	0.45	9153.4	0.92	0.66
9	14/02/2007	58.64	0.14	9153.4	0.92	0.36
10	18/02/2007	67.47	0.26	9153.4	0.92	0.48
11	20/02/2007	47.41	0.34	9153.4	0.92	0.23
12	18/04/2007	53.53	0.43	9153.4	0.92	0.30
13	19/04/2007	15.74	0.13	9153.4	0.92	0.02
14	22/04/2007	61.38	0.31	9153.4	0.92	0.40
15	29/04/2007	67.69	0.79	9153.4	0.92	0.48
16	02/05/2007	20.30	0.21	9153.4	0.92	0.04
17	01/02/2008	46.93	0.18	9153.4	0.92	0.23
18	27/02/2008	111.67	1.19	9153.4	0.92	1.32
19	09/03/2008	42.63	0.19	9153.4	0.92	0.19
20	01/04/2008	56.38	1.11	9153.4	0.92	0.33
21	07/04/2008	26.90	0.64	9153.4	0.92	0.07
22	02/05/2008	25.64	0.16	9153.4	0.92	0.07
23	19/02/2009	18.80	0.12	9153.4	0.92	0.03
24	03/04/2009	83.82	0.28	9153.4	0.92	0.74
25	04/04/2009	30.23	0.11	9153.4	0.92	0.09
26	06/04/2009	44.95	0.17	9153.4	0.92	0.21
27	04/05/2009	19.30	0.17	9153.4	0.92	0.04
28	25/01/2010	34.04	0.35	9153.4	0.92	0.12
29	21/03/2010	108.20	2.04	9153.4	0.92	1.24
30	09/04/2010	43.68	0.35	9153.4	0.92	0.20
31	11/04/2010	61.21	1.22	9153.4	0.92	0.39
32	26/02/2011	40.39	0.46	9153.4	0.92	0.17
33	01/03/2011	57.91	1.04	9153.4	0.92	0.35
34	05/03/2011	72.64	1.26	9153.4	0.92	0.56
35	05/05/2011	49.78	0.35	9153.4	0.92	0.26

<b>36</b>	26/03/2012	45.72	0.20	9153.4	0.92	0.22
<b>37</b>	26/03/2013	42.67	0.40	9153.4	0.92	0.19
<b>38</b>	19/04/2013	51.05	0.23	9153.4	0.92	0.27
<b>39</b>	20/12/2013	64.01	0.29	9153.4	0.92	0.43
<b>40</b>	23/12/2013	60.71	0.15	9153.4	0.92	0.39
<b>41</b>	04/02/2014	31.75	0.11	9153.4	0.92	0.10
<b>42</b>	11/02/2014	44.70	0.20	9153.4	0.92	0.21

RMSE = 0,406; RSR = 0,129; PBIAS = 57,13%

Figura 16 - Comparação linear entre o escoamento medido e o calculado para CN = 3 e  $\lambda = 0,0001$ .



Uma hipótese que pode ser adicionada é a da dificuldade do método SCS/CN em explicar o fenômeno em ambientes semiáridos. Ainda na década de 1990, Hjelmfelt (1991) mostrou que a equação de escoamento funcionou razoavelmente bem para as bacias hidrográficas testadas nos Estados Unidos Central e Sudeste. No entanto, para bacias testadas no sudoeste semiárido, o ajuste foi baixo. Hjelmfelt (1987) também aplicou essa abordagem a uma bacia hidrográfica urbana, em Illinois, EUA, com bons resultados. Com isso evidenciou-se que a equação de escoamento geralmente apresentava-se razoavelmente bem onde o escoamento era uma fração substancial da chuva, mas mal nos casos em que o escoamento era uma pequena fração da precipitação, assim como acontece na BEA, com coeficiente de escoamento abaixo de 1,0%.

## 4.2 Simulações de evento de escoamento

Após classificação dos 42 eventos como de região CNa (macroporos abertos, menor propensão a escoamento) e CNb (macroporos fechados, maior propensão a escoamento), aplicou-se na equação de Ven Te Chow (vide seção 3.4) os respectivos desvios-padrão e mediana para cada simulação.

Para enquadrar nas regiões CNa ou CNb os critérios utilizados foram a precipitação antecedente de 5 dias  $< 12,7$  mm (embasado no sugerido pelo USDA) e  $CN < 53,5$  (embasado nos resultados da seção 4.1.1). A combinação teve o intuito de evitar tendência, por exemplo, de uma grande chuva concentrada poucos dias antes do evento de escoamento, que acarretaria em alto CN devido a saturação do solo.

Na maioria dos casos, a faixa de respostas teve amplitude relativamente alta, mesmo excluindo-se os *outliers*. Por exemplo, da simulação 01, interpreta-se que “para uma chuva de 92,65 mm, com 95% de confiabilidade, o escoamento superficial estará entre 0,00 e 8,10 mm”. Já a simulação 06 indica que para precipitação de 22,81 mm, o escoamento superficial estará entre os valores 0,00 e 0,06 mm. Como esperado, maiores chuvas geraram faixas em ordem de grandeza maiores, por exemplo o evento 18 (116,67 mm) respondeu com 28 mm de escoamento em média. Em termos de escoamento superficial mensurado na BEA isto é muito, haja vista que em 10 anos de observações o maior registro foi de 2,16 mm.

A Tabela 7 mostra o nível de acerto das previsões com os dados observados da BEA. Para 95% de garantia, as simulações acertaram 60% dos eventos da BEA, o que não é satisfatório ao levar em consideração a faixa dada previamente. Apesar do modelo hidrológico aqui avaliado ser bastante simples e não considerar alguns fatores essenciais para o escoamento superficial (vide seção 2.6), esperava-se que o índice de acerto fosse, no mínimo, da mesma ordem de grandeza. Isto evidencia o caráter incerto dos processos hidrológicos, contudo, mais ainda as incertezas presentes no modelo utilizado.

Tabela 7 - Síntese dos resultados após simulação de eventos de escoamento superficial para 95% de garantia. O asterisco (\*) indica um acerto (dado observado dentro da faixa de respostas)

<b>Evento</b>	<b>P (mm)</b>	<b>Pe (mm)</b>	<b>CNa/CNb</b>	<b>Faixa de respostas (mm)</b>	<b>Acerto</b>
1	92.65	0.45	b	5.36 - 30.13	
2	82.77	2.16	b	3.41 - 24.03	
3	49.70	0.80	b	0.00 - 6.77	*
4	57.32	0.18	a	0.00 - 0.47	*
5	77.79	0.16	a	0.00 - 3.73	*
6	22.81	0.14	b	0.00 - 0.05	
7	55.12	0.40	b	0.04 - 8.93	*
8	79.10	0.45	b	2.59 - 21.81	
9	58.64	0.14	a	0.00 - 8.39	*
10	67.47	0.26	b	0.89 - 14.59	
11	47.41	0.34	b	0.00 - 5.85	*
12	53.53	0.43	b	0.02 - 8.32	*
13	15.74	0.13	b	0.00 - 0.00	
14	61.38	0.31	b	0.38 - 12.04	
15	67.69	0.79	b	0.98 - 15.32	
16	20.30	0.21	b	0.00 - 0.00	
17	46.93	0.18	b	0.00 - 5.67	*
18	111.67	1.19	b	13.26 - 47.37	
19	42.63	0.19	b	0.00 - 4.14	*
20	56.38	1.11	b	0.10 - 9.64	*
21	26.90	0.64	b	0.00 - 0.43	
22	25.64	0.16	b	0.00 - 0.06	
23	18.80	0.12	b	0.00 - 0.00	
24	83.82	0.28	a	0.00 - 5.18	*
25	30.23	0.11	b	0.00 - 0.71	*
26	44.95	0.17	b	0.00 - 4.36	*
27	19.30	0.17	b	0.00 - 0.00	
28	34.04	0.35	a	0.00 - 1.39	*
29	108.20	2.04	b	9.22 - 39.25	
30	43.68	0.35	b	0.00 - 3.94	*
31	61.21	1.22	b	0.21 - 10.98	*
32	40.39	0.46	b	0.00 - 2.93	*
33	57.91	1.04	b	0.05 - 9.48	*
34	72.64	1.26	b	1.26 - 16.83	*
35	49.78	0.35	b	0.00 - 6.08	*
36	45.72	0.20	b	0.00 - 4.62	*
37	42.67	0.40	b	0.00 - 3.63	*
38	51.05	0.23	b	0.00 - 0.09	
39	64.01	0.29	a	0.00 - 1.23	*
40	60.71	0.15	b	0.18 - 10.75	

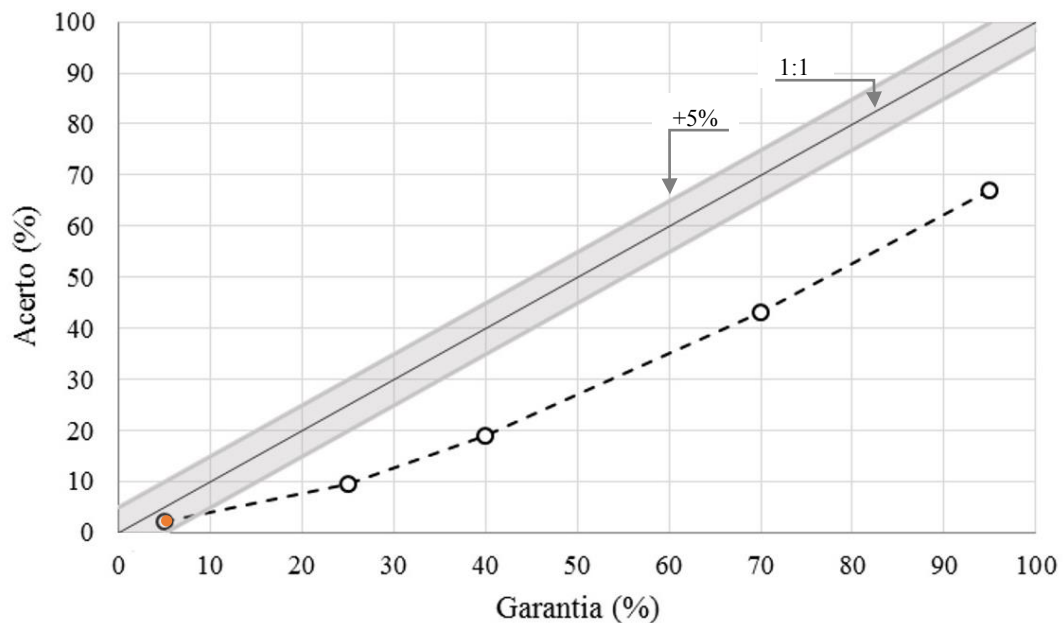
41	31.75	0.11	b	0.00 - 0.96	*
42	44.70	0.20	b	0.00 - 4.27	*

Um resultado notável foi o dos acertos relacionados ao eventos da região CNa serem mais recorrentes (exceto um deles não estava na faixa de respostas). É possível atribuir a isto o fato da escolha da f.d.p. Gaussiana representar melhor estes dados do que aqueles da região CNb (a qual Weibull 3 explicou ligeiramente melhor). De fato, uma distribuição Normal não foi observada na região CNb, segundo o resultado do teste de Normalidade de Anderson-Darling, mas o abreviado coeficiente de assimetria da distribuição da região CNb pareceu permitir esta escolha. Todavia, esta hipótese (relacionada ao proporcional maior índice de acerto na região CNa) necessita de investigação mais aprofundada, sobretudo porque a Caatinga, por ser um bioma complexo, mostra-se desafiante do ponto de vista do conhecimento ou representação de sua variabilidade espaço-temporal (ver MORO *et al.*, 2016). Por isso, na maioria das vezes certas generalizações são assumidas quanto ao ambiente e seus processos.

Diante deste resultado buscou-se encontrar qual a faixa de garantia em que o índice de acerto da previsão fosse equivalente. Como o índice de acerto foi de 60%, partiu-se então deste valor também para a garantir que os 40% de valores mais extremos fossem retirados da série sintética de escoamento superficial. É importante ressaltar que, como esta pesquisa envolve incertezas e um grande número de simulações, um valor ótimo talvez não fosse encontrado. Isto porque as simulações aleatórias do MMC podem permitir que a faixa de valores mude. Em outros termos, tomando como exemplo a faixa de respostas para o evento 1, observa-se que varia de 5,36 a 30,13mm. Contudo, um novo procedimento estocástico poderia deslocar para mais ou para menos estes valores, mas preservando as características estatísticas da série. Então uma margem de 5% foi atribuída (Figura 17).

Segundo o procedimento, o modelo SCS/CN acerta somente cerca de 5% dos casos de escoamento superficial para dada precipitação. Dos 42 eventos utilizados nesta pesquisa, em apenas 2 deles o escoamento observado estava dentro da faixa de observações simuladas.

Figura 17 – Relação entre garantia e índice de acerto do modelo SCS/CN. O ponto vermelho indica a nota atribuída ao modelo SCS/CN.



Além das desvantagens e limitações do modelo (apontadas na seção 2.6) há ainda: a ausência de orientação clara sobre como incluir e variar condição antecedente de umidade no solo; a precisão variável do método para diferentes biomas; a ausência de um fornecimento explícito sobre efeitos de escala espacial e temporal (PONCE; HAWKINS, 1996). Claro que a simplicidade dos parâmetros do modelo também é discutida.

Em recente trabalho de Orth et al. (2015), os autores objetivaram responder a questão “a performance do modelo hidrológico melhora com o aumento de sua complexidade?” Os resultados variaram consideravelmente entre as áreas de estudo investigadas. Em contraste, as diferentes medidas que consideraram para estimar a concordância entre modelos e observações levam a conclusões semelhantes, indicando que o desempenho dos modelos avaliados foi semelhante em diferentes escalas de tempo. Os pesquisadores concluíram que a complexidade adicional não necessariamente leva a um melhor desempenho dos modelos hidrológicos, e que o desempenho pode variar muito dependendo da variável hidrológica considerada (por exemplo, escoamento *versus* umidade do solo) ou condições hidrológicas (cheias *versus* secas).

Os resultados da pesquisa na BEA são opostos aos que documentam trabalhos cuja metodologia avalia minuciosamente o modelo SCS/CN (como é o caso de Ponce e Hawkins, 1996). A implicação, segundo o trabalho destes autores, é que o número da curva de escoamento

como desenvolvido pelo SCS é mais adequado para estimativas de fluxo desprezível (assim como os da BEA). Tipicamente, este é o caso de correntes de primeira e segunda ordem em regiões subúmidas e úmidas, e de fluxos efêmeros em regiões áridas e semiáridas, mas não se aplica à situação da Bacia de Aiuaba. É reforçada aqui a necessidade de futuras investigações científicas de natureza geológica e a nível de microtopografia na Bacia Experimental de Aiuaba, visto que muitas incertezas na determinação do escoamento superficial (e dos fatores que o promovem) nesta região repousam sobremaneira em processos da natureza ainda não compreendidos.

A análise utilizando o método de Monte Carlo, desde que associada ao conhecimento da função densidade de probabilidade das variáveis e a outros elementos estatísticos, mostra-se, portanto, viável e replicável em diferentes bacias hidrográficas com diferentes modelos chuva/deflúvio. Cabe enfatizar que neste trabalho foi avaliada a incerteza presente nos parâmetros do modelo SCS/CN e na distribuição do escoamento superficial, bem como a incerteza estrutural do modelo.

## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O trabalho buscou analisar as incertezas do modelo hidrológico SCS/CN quando aplicado a uma bacia de vegetação preservada em região semiárida brasileira. A importância reside no fato de utilizar dez anos contínuos (2005-2014) de dados medidos em região com banco de dados hidrológicos ainda escasso e com alto potencial de ser palco de pesquisa científica.

Da investigação, pôde-se concluir que o método de análise combinatória em pares de eventos mostrou-se significativamente aceitável quando fixado um dos parâmetros ( $\lambda$  ou CN) por induzir aos resultados subsequentes de simulações de Monte Carlo, também satisfatórios. A otimização feita pelo método Gradiente Reduzido Generalizado (GRG não-linear) buscando simultaneamente calibrar os parâmetros  $\lambda$  e CN, quando comparada às outras duas abordagens apresenta diferença em relação aos resultados. Apesar das pequenas discrepâncias, esse resultado mostra a mesma tendência das outras abordagens usadas, qual seja, valores menores de CN e  $\lambda$  que aqueles originalmente sugeridos pelo método SCS/CN.

Valores atipicamente baixos ( $\lambda^* = 0,0001$  e  $CN^* = 3$ ) foram os que melhor explicaram os eventos de escoamento na BEA. Entretanto, para que estes números fossem alcançados, o parâmetro S se tornou inaceitável do ponto de vista físico por aumentar consideravelmente as abstrações iniciais e mostrar valores da ordem de 9,0 m.

Ressalta-se ainda que os resultados obtidos nesta pesquisa corroboram com aqueles que documentam a variabilidade de evento para evento dos parâmetros do modelo, a despeito do que é recomendado pelas tabelas do NEH-4.

Um resultado de destaque foi a descoberta de um comportamento bimodal do CN e do  $\lambda$  no histograma de respostas, tanto da análise combinatória quanto das análises evento a evento. Isto indica que o CN varia também por efeito das condições de solo provocadas pela dinâmica das raízes na Caatinga e a consequente macroporosidade. Viu-se que cada região dos picos possui distribuição e elementos estatísticos distintos, então chamou-se de região (a) e região (b), sendo utilizados estes valores para as simulações, respeitando-se o caso de cada evento de precipitação. Provou-se que as abstrações iniciais, influenciadas pela dinâmica das raízes no solo, contribuem significativamente para as incertezas na modelagem hidrológica desta bacia

A proposta de análise de incertezas do modelo hidrológico aqui desenvolvida mostrou-se adequada aos objetivos do estudo, contanto sejam conhecidas algumas informações



estatísticas fundamentais das variáveis, como a função densidade de probabilidade. As simulações baseadas no Método de Monte Carlo acertaram cerca de 5-10% as previsões. Este número não é satisfatório e a justificativa reside na simplicidade do modelo SCS/CN. Devido ao uso consagrado inclusive em modelos hidrológicos mais sofisticados, sugere-se que sua aplicação seja associada a uma abordagem estocástica.

Recomenda-se que esta metodologia seja replicada na BEA com outros modelos hidrológicos mais sofisticados, a fim de validar sua utilização em outras regiões inclusive de regime hidrológico diferente da área de estudo desta pesquisa.

Ademais, é notável a necessidade de investigações científicas de natureza geológica e a nível de microtopografia na Bacia Experimental de Aiuaba, visto que muitas incertezas na determinação do escoamento superficial e dos fatores que o promovem nesta região repousam sobremaneira em elementos da natureza ainda não compreendidos.

## REFERÊNCIAS

- ABADIE, J.; CARPENTIER, J. Generalization of the Wolfe Reduced Gradient Method to the Case of Nonlinear Constraints. In: **Optimization**. New York: Academic Press, 1969.
- ABBOTT, M. B.; BATHURST, J. C.; CUNGE, J. A.; O'CONNELL, P. E.; RASMUSSEN, J. An introduction to the European Hydrologic System - Systeme Hydrologique Europeen, SHE 1: history and philosophy of a physically based distributed modeling system. **Journal of Hydrology**, v. 87, p.45-59. 1986a.
- ABBOTT, M. B.; BATHURST, J. C.; CUNGE, J. A.; O'CONNELL, P. E. An introduction to the European Hydrologic System - Systeme Hydrologique Europeen, SHE 2: structure of a physically based distributed modeling system. **Journal of Hydrology**, v. 87, p.61-77. 1986b.
- ALMEIDA, C. L. de. **Relações solo-planta-atmosfera em caatinga preservada: O caso da Bacia Experimental de Aiuaba**. 2016. 128 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, Brasil. 2016.
- ALMEIDA, C. L. de; ARAÚJO, J. C. de; COSTA, M. C. G.; ALMEIDA, A. M. M. de; ANDRADE, E. M. de. Fallow Reduces Soil Losses and Increases Carbon Stock in Caatinga. **FLORAM**, v. 24, p. 1-10, 2017.
- ANDRADE, E. M.; SENA, M. G. T.; SILVA, A. G. R.; PEREIRA, F. J. S.; LOPES, F. B. Uncertainties of the rainfall regime in a tropical semi-arid region: the case of the State of Ceará. **Revista Agro@ambiente On-line**, v. 10, n. 2, p. 88-95, 2016.
- ANDREOLI, R. V.; KAYANO, M. T. ENSO-Related Anomalies in South America and Associated Circulation Features During Warm and Cold Pacific Decadal Oscillation Regimes. **International Journal of Climatology**, v.25, p. 2017-2030, 2005.
- APPELS, W. M.; BOGAART, P. W.; van der ZEE, S. E. A. T. M. Influence of spatial variations of microtopography and infiltration on surface runoff and field scale hydrological connectivity. **Adv. Water Resour.** v. 34, n. 2, p. 303–313, 2011.
- ARAÚJO, E. M. **Estimativa do assoreamento de um pequeno reservatório do semiárido rural através do estudo dos solos e de fontes de sedimento**. 2012. 72 f. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.
- ARAÚJO, J. C. de; PIEDRA, J. I. G. Comparative hydrology: analysis of a semiarid and a humid tropical watershed. **Hydrological Processes**, v. 23, p. 1169-1178, 2009.
- ARNOLD, J. G.; SRINIVASAN, R.; MUTTIAH, R. S.; WILLIAMS, J. R. Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development. **Journal of the American Water Resources Association**. v.34, n.1, p.73–89. 1998.
- BEASLEY, D. B.; MONKE, E.J.; HUGGINS, L. F. **ANSWERS: A model for watershed planning**. Purdue Agricultural Experiment Station Journal Paper n. 7038. 34p. 1977.

BECK, M. B.; VAN STRATEN, G. **Uncertainty and Forecasting of Water Quality**. Berlin: Springer-Verlag, 1983. 388 p.

BELTAGY, A.; MADKOUR, M. Impact of climate change on arid lands agriculture. **Agricultural and Food Security**. v. 1, n. 3, 2012.

BERGSTRÖM, S. The HBV Model. *In*: SINGH, V. P. (ed.) **Computer models of watershed Hydrology**. Baton Rouge: Water Resources Publications, 1995. 1130 p.

BEVEN, K. J. Prophecy, reality and uncertainty in distributed hydrological modelling. **Advances in Water Resources**. v.16, p. 41-51. 1993.

BEVEN, K. J. Changing ideas in hydrology - The case of physically-based models. **Journal of Hydrology**, v. 105, n. 1-2, p. 157-172, 1989.

BEVEN, K.J., FREER, J. Equifinality, data assimilation, and uncertainty estimation in mechanistic modelling of complex environmental systems. **Journal of Hydrology**. v. 249, p. 11-29. 2001.

BEVEN, K. J. A manifesto for the equifinality thesis. **Journal of Hydrology**, v. 320, p. 18-36, 2006.

BEVEN, K. J., A. BINLEY. The future of distributed models: Model calibration and uncertainty prediction, **Hydrological Processes**, v. 6, p. 279- 298. 1992.

BEVEN, K. J. **Environmental modelling: an uncertain future?** Taylor & Francis. London & New York. 2009. 310 p.

BEVEN, K. J. **Rainfall-Runoff Modelling: The Primer**, 2. ed John Wiley & Sons. 2012. 460p.

BEVEN, K. Facets of uncertainty: Epistemic uncertainty, non-stationarity, likelihood, hypothesis testing, and communication. **Hydrological Sciences Journal**, v. 61, n. 9, p. 1652-1665, 2016.

BLAZKOVA, S.; BEVEN, K. J. Flood frequency estimation by continuous simulation for a catchment treated as ungauged (with uncertainty). **Water Resources Research**, v. 38, n. 8, p. 14.1-14.14, 2002.

BRASIL. Ministério da Educação. Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior. Portaria nº 206, de 4 de setembro de 2018. **Diário Oficial da União**, Brasília, nº 172, 5 set. 2018. Seção 1, p. 22. Disponível em: <[http://www.imprensa nacional.gov.br/materia/-/asset\\_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/39729251/do1-2018-09-05-portaria-n-206-de-4-de-setembro-de-2018-39729135](http://www.imprensa nacional.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/39729251/do1-2018-09-05-portaria-n-206-de-4-de-setembro-de-2018-39729135)>. Acesso em: 19 out. 2018.

BRAZIER, R. E.; BEVEN, K.J.; FREER, J.; ROWAN, J.S. Equifinality and uncertainty in physically based soil erosion models: application of the GLUE methodology to WEPP-the

Water Erosion Prediction Project - for sites in the UK and USA. **Earth Surface Processes and Landforms**. v. 25. n.8, p. 825-845. 2000.

BRONSTERT, A.; BÁRDOSSY, A. Uncertainty of runoff modelling at the hillslope scale due to temporal variations of rainfall intensity. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 28, p. 283–288, 2003.

CHEN, C. L. **Urban storm inlet study, soil-cover-moisture complex: analysis of parametric infiltration models for highway side slopes**. Federal Highway Administration Report, FHWA-RD-76-120, V5, Federal Highway Administration, Washington, DC. 1976.

CHEN, L.; SELA, S.; SVORAY, T.; ASSOULINE, S. The role of soil-surface sealing, microtopography, and vegetation patches in rainfall-runoff processes in semiarid areas. **Water Resources Research**, v. 49, n. 9, p. 5585–5599, 2013.

CHO, H.; BONES, E. Quantification of uncertainties in the 100-year flow at an ungaged site near a gaged station and its application in Georgia. **Journal of Hydrology**. v. 539, p.640-647. 2016

CHOW, V. T. **Handbook of Applied Hydrology**. Mc-Graw-Hill Book, New York. 1495 p. 1964.

CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. **Applied hydrology**. 2 ed. New York: McGraw-Hill, 572 p. 1988

CLARKE, R. T. A review of some mathematical models used in hydrology, with observations on their calibration and use. **Journal of Hydrology**, 19:1–20, 1973.

COSTA, A. C. **Hidrologia de uma bacia experimental em Caatinga conservada no semi-árido brasileiro**. 2007. 141 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007.

COSTA, C. A. G. **Umidade do solo e disponibilidade hídrica na zona das raízes em condições naturais de caatinga preservada**. 2012. 182 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.

COSTA, C. A. G.; LOPES, J. W. B.; PINHEIRO, E. A. R.; ARAÚJO, J. C. de; GOMES FILHO, R. R. Spatial behaviour of soil moisture in the root zone of the Caatinga Biome. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 44, n. 4, p. 685–694, 2013.

COSTA, J. A.; DA SILVA, D. F. Distribuição espaço-temporal do Índice de anomalia de chuva para o Estado do Ceará. **Revista Brasileira de Geografia Física** v.10, n.04, p.1002-1013. 2017.

CRAWFORD, N. H.; LINSLEY, R. S. **Digital simulation in hydrology: The Stanford Watershed Model IV**. Technical Report n. 39, Department of Civil Engineering, Stanford University, Palo Alto, California. 1966.

DA SILVA, D. F. **Análise de aspectos climatológicos, ambientais, agroeconômicos e de seus efeitos sobre a Bacia hidrográfica do rio Mundaú (AL e PE)**. 2009. 174 f. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2009.

DA SILVA, D. F.; SOUSA, A. B.; MAIA, L. M.; RUFINO, L. L. Efeitos da associação de eventos de ENOS e ODP sobre o Estado do Ceará. **Revista de Geografia**, v.29, n.2, 2012.

DAMÉ, R. de C. F.; TEIXEIRA, C. F. A.; TERRA, V. S. S., Comparação de diferentes metodologias para estimativa de curvas intensidade-duração-frequência para Pelotas-RS. **Engenharia Agrícola**, v. 28, n. 2, p.245-255. 2008.

DANIEL, E. B. et al. Watershed Modeling and its Applications : A State-of-the-Art Review. **The Open Hydrology Journal**, v. 5, p. 26–50, 2011.

DOOGE, J. C. I. **Linear Theory of Hydrologic Systems**, Technical Bulletin n. 1948, ARS, US Department of Agriculture. 1973.

FARIAS, J. A. M. **Métodos de geração de vazões mensais e suas influências sobre a curva de garantia versus vazão regularizada em reservatórios do estado do Ceará**. 2003. 120 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2003.

FARIAS, T. R. L.; ARAUJO, J. C. Hidrologia e sedimentologia comparada de pequenas bacias em região tropical sub-úmida no Ceará. *In: IX SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE*, 2008, Salvador. **Anais...**, 2008.

FIERING, M.B. **Streamflow synthesis**. Cambridge, Massachusetts, Harvard University Press. 1967.

FIGUEIREDO, J. V. de; ARAÚJO, J. C. de; MEDEIROS, P. H. A.; COSTA, A. C. Runoff initiation in a preserved semiarid Caatinga small watershed, Northeastern Brazil. **Hydrological Processes**, v. 30, n. 13, p. 2390–2400, 2016.

FURTADO, C. **Seca e poder: entrevista com Celso Furtado**. São Paulo: Editora Fundação Perseu Abramo, 1998. 94 p.

GÜNTNER, A. **Large-scale hydrological modeling in the semi-arid North-East of Brazil**. PIK-Report No. 77. Potsdam Institute for Climate Research, Germany. 2002.

GÜNTNER, A.; BRONSTERT, A. Representation of landscape variability and lateral redistribution processes for large-scale hydrological modelling in semi-arid areas. **Journal of Hydrology**, v. 297, p. 136–161, 2004.

GUPTA, H.V.; SOROOSHIAN, S.; YAPO, P. O. Towards improved calibration of hydrologic models: multiple and incommensurable measures of information, **Water Resour. Res.** v. 34, p. 751– 763. 1998.

GUSWA, A. J.; HAMEL, P.; MEYER, K. Curve Number Approach to Estimate Monthly and Annual Direct Runoff. **Journal of Hydrologic Engineering**, v. 23, n. 2, 2018.

HAAN, C. T. Parametric uncertainty in hydrologic modeling. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St Joseph, v. 32, n. q, p. 137-45. 1989.

HAILEGEOGIS, T. T.; ALFREDSSEN, K. Analyses of extreme precipitation and runoff events including uncertainties and reliability in design and management of urban water infrastructure. **Journal of Hydrology**. v. 544, p.290-305. 2016.

HAWKINS, R. H. Runoff curve numbers for partial area watersheds. **J. Irrig. Drain. Div. ASCE.**, v. 105, p. 375–389, 1979.

HAWKINS, R. H. A comparison of predicted and observed runoff curve numbers ASCE. **Special Conf. of Irrigation and Drainage Division** (NY: ASCE) p. 702–709, 1984.

HAWKINS, R.H., WARD, T.J., WOODWARD, D.E., VAN MULLEM, J.A. **Curve Number hydrology - State of practice**. The ASCE/EWRI Curve Number Hydrology Task Committee. 2009. 106 p.

HELMERS, M. J.; EISENHAEUER, D. E. Overland flow modeling in a vegetative filter considering non-planar topography and spatial variability of soil hydraulic properties and vegetation density. **Journal of Hydrology**, v. 328, p. 267-282, 2006.

HERRERA-PANTOJA, M; HISCOCK, K.M. Projected impacts of climate change on water availability indicators in a semi-arid region of central Mexico. **Environmental Science & Policy**. v.54, p.81–89, 2015.

HINES, W. W.; MONTGOMERY, D. C.; GOLDSMAN, D. M.; BORROR, C.M. **Probabilidade e estatística na engenharia**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC. 2012. 587 p.

HJELMFELT, A. T.; KRAMER, L. A.; BURWELL, R. E. Curve numbers as random variables. *In*: SINGH, V. P. (ed.) **Rainfall–Runoff Relationships**. Water Resources Publications, 1982.

HJELMFELT, A.T. Curve numbers in urban hydrology. Topics in Urban Hydraulics and Hydrology, **Proceedings.... XXII Cong.**, Intr. Assoc. for Hydr. Research, p. 73–78. 1987.

HJELMFELT, A.T. Investigation of curve number procedure. **J. Hydr. Engr.** v. 117, n. 6, p. 725–737. 1991.

HYDROLOGIC ENGINEERING CENTER. **HEC - 1, Flood Hydrograph Package - Users Manual**. U.S. Army Corps of Engineers, Davis, California. 1981.

KNISEL, W. G. **CREAMS**: A field-scale model for chemicals, runoff and erosion from agricultural management systems. U.S. Department of Agriculture Conservation Research Report n. 26, 640p. 1980.

KOUWEN, N.; SOULIS, E. D.; PIETRONIRO, A.; DONALD, J.; HARRINGTON, R. A. Grouped response units for distributed hydrologic modeling. **J. Water Resour. Plan. Manage.** v.119, n.3, p.289–305.1993.

KOUWEN, N. **WATFLOOD/SPL**: Hydrological model and flood forecasting system. Dept. of Civil Engineering, Univ. of Waterloo, Waterloo. 2000.

KOVACS, G. Técnicas para comparación interregional. *In: Hidrología comparada: un enfoque ecológico a los recursos hídricos y de suelo*, Falkenmark M, Chapman T (eds). UNESCO-CEDEX: Madrid; p. 133–145. 1993.

KUCZERA, G.; WILLIAMS, B. J. Effect of rainfall errors on accuracy of design flood estimates, **Water Resour. Res.** v. 28, n. 4, p. 1145–1153, 1992.

KUCZERA, G. Efficient subspace probabilistic parameter organization for catchment models. **Water Resour. Res.**, v. 33, p. 177-185, 1997.

KUCZERA, G., PARENT, E. Monte Carlo assessment of parameter uncertainty in conceptual catchment models: The Metropolis algorithm, **Journal of Hydrology**. v. 211, p. 69–85, 1998.

KUSANGAYA, S.; WARBURTON, M.L.; VAN GARDEREN, E.A.; JEWITT, G.P.W. Impacts of climate change on water resources in southern Africa: a review. **Phys.Chem. Earth** v.67, p.47–54 2014.

LAURENSEN, E. M.; MEIN, R. G. **RORB - v.3**: Runoff routing program - user manual. 2. ed Department of Civil Engineering, Monash University. Monash, Australia. 1983.

LIMA, Y. C. P. **Análise do assoreamento de um pequeno reservatório: estudo de caso do açude Boqueirão, Aiuaba, Ceará.** 2010. 84 f. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.

LING, L.; YUSOP, Z. A micro focus with macro impact: Exploration of initial abstraction coefficient ratio ( $\lambda$ ) in Soil Conservation Curve Number (CN) methodology. 8<sup>th</sup> International Symposium of the Digital Earth. **Anais...Sarawak**: 2014. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/18/1/012121>. 2014.

LINHOSS, A. C.; SIEGERT, C. M. A comparison of five forest interception models using global sensitivity and uncertainty analysis. **Journal of Hydrology**. v.538, p.109-116. 2016.

LINSLEY, R. K. Rainfall–runoff models - an overview. *In: Proc. Int. Symp. on Rainfall–Runoff Relationship*, SINGH, V. P (ed.). Water Resources Publications: Littleton, CO. 1982.

LIU, Y.; GUPTA, H. V. Uncertainty in hydrologic modeling: Toward an integrated data assimilation framework. **Water Resources Research**, v. 43, n. 7, p. 1–18, 2007.

LIU, Y., FU, B., LU, Y., WANG, Z., GAO, G. Hydrological responses and soil erosion potential of abandoned cropland in the Loess Plateau. **Geomorphology**. v.138, 404–414. 2012.

LOUCKS, D. P.; VAN BEEK, E. **Water Resources Systems Planning and Management**. UNESCO, 2005. 689 p.

LUDWIG, J. et al. Vegetation patches and runoff- erosion as interacting ecohydrological processes in semiarid landscapes. **Ecology**, v. 86, n. 2, p. 288–297, 2005.

MA, L., J. C. ASCOUGH II, L. R. AHUJA, M. J. SHAFFER, J. D. HANSON, K. W. ROJAS. Root zone water quality model sensitivity analysis using Monte Carlo simulation. **Trans. ASAE** 43(4): 883-895. 2000.

MAGALHÃES, A.; FILHO, H. C.; GARAGORRY, F.; GASQUES, J. G.; MOLION, L. C.; NETO M.; NOBRE, C. A.; PORTO, E.; REBOUÇAS, O. The effects of climate variations on agriculture in Northeast Brazil. In: PARRY, M.; CARTER, T.; KONIJN, N. (ed.) **The impact of climate variations on agriculture**. v.2. Assessments in semi-arid regions. Amsterdam: Kluwer Academic Publishers, 1988.

MAMEDE, G. L.; ARAUJO, N.A.M.; SCHNEIDER, C. M.; ARAUJO, J. C.; HERRMANN, H.J. Overspill avalanching in a dense reservoir network. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 109, p. 7191-7195, 2012.

MARENGO, J. A.; ALVES, L. M.; BESERRA, E. A.; LACERDA, F. F. Variabilidade e mudanças climáticas no semiárido brasileiro. In: GHEYI, H. R., *et al.* (Orgs.) **Recursos Hídricos em Regiões Áridas e Semiáridas**. 1. ed. Cruz das Almas: Instituto Nacional do Semiárido, 2011. 439 p.

MAYOR, Á. G.; BAUTISTA, S.; BELLOT, J. Factors and interactions controlling infiltration, runoff, and soil loss at the microscale in a patchy Mediterranean semiarid landscape. **Earth Surface Processes and Landforms**. v.34, p.1702–1711, 2009.

MEDEIROS, P. H. A.; ARAÚJO, J. C. de; BRONSTERT, A. Interception measurements and assessment of Gash model performance for a tropical semi-arid region. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 40, n. 2, p. 165-174, 2009.

MENDOZA, V.M., 2005. Historical droughts in Central Mexico and their relation with El Niño. **Journal of Applied Meteorology**. v.44, p.709–716, 2005.

MICHEL, C.; ANDRÉASSIAN, 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, p. 1–6, 2005.

MISHRA, S. K.; KUMAR, S. R.; SINGH, V. P. Calibration and validation of a general infiltration model. **Hydrological Processes**, v. 13, p. 1691–1718, 1999.

MISHRA, S. K.; SINGH, V. P. **Soil conservation service curve number (SCS-CN) methodology**. Baton Rouge: Springer Science, 2003. 534 p.

MOCKUS, V. **Estimation of total (peak rates of) surface runoff for individual storms**. Exhibit A of Appendix B, Interim Survey Report Grand (Neosho) River Watershed, U.S.D.A., Dec. 1. 1949.



- MONTE-MOR, R. C. de A. **Análise de Processos Hidrológicos em Bacias de Rios Intermitentes no Semiárido Mineiro**. 2012. 306 p. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.
- 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.
- MORO, M.F.; LUGHADHA, E.N.; ARAÚJO, F.S.; MARTINS, F.R. A phytogeographical metaanalysis of the semiarid caatinga domain in Brazil. **Botanical Review**, v.82, p.91–148, 2016.
- NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models Part I – a discussion of principles. **Journal of Hydrology**. v. 10, p. 282-290, 1970.
- NEARING, M.; FOSTER, G. R.; LANE, L.J.; FINKNER, S. C. A Process-Based Soil Erosion Model for USDA-Water Erosion Prediction Project Technology. **Transactions of the ASAE**. v. 32, n. 5, p. 1587-1593, 1989.
- NOGUEIRA, R. J. M. C.; SILVA, E. C. Comportamento estomático em plantas jovens de *Schinopsis brasiliensis* Engl. cultivadas sob estresse hídrico. **Iheringia**, v.57, n.1, p.31-38. 2002.
- O’CONNELL P. E. A historical perspective. *In*: BOWLES, D. S.; O’CONNELL, P. E., (ed.), **Recent Advances in the Modeling of Hydrologic Systems**, p. 3–30. Kluwer, Dordrecht, 1991.
- ORTH, R. et al. Does model performance improve with complexity? A case study with three hydrological models. **Journal of Hydrology**, v. 523, p. 147–159, 2015.
- PILGRIM, D. H.; CHAPMAN, T. G.; DORAN, D. G. Problems of rainfall-runoff modelling in arid and semiarid regions. **Hydrological Sciences Journal**, v. 33, n. 4, p. 379–400, 1988.
- PINHEIRO, E.A.R.; COSTA, C.A.G.; ARAÚJO, J. C. de. Effective root depth of the Caatinga biome. **Journal of Arid Environments**. v.89, p.1–4. 2013.
- PINHEIRO, E. A. R. et al. Importance of soil-water to the Caatinga biome, Brazil. **Ecohydrology**, v. 9, n. 7, p. 1313–1327, 2016.
- 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.
- REFSGAARD, J. C.; STORM, B. MIKE SHE. *In*: SINGH, V. P. (ed.) **Computer Models of Watershed Hydrology**. Water Resources Publications, Highlands Park, CO, 1995.

ROCKWOOD, D. M. Theory and Practice of the SSARR Model as related to analyzing and forecasting the response of hydrologic systems. **Proceedings...** Proceedings of the International Symposium on Rainfall-Runoff Modeling, Mississippi State University, 1982.

RODDA, H. J. E., LITTLE, M. A. **Understanding Mathematical and Statistical Techniques in Hydrology: An examples-based Approach.** Wiley-Blackwell. Oxford. 2015. 90 p.

RODRIGUES, G. P.; ARAÚJO, J. C. de. Intensidade-Duração-Frequência de chuvas intensas para a Bacia Experimental de Aiuaba- CE. *In: III SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS NATURAIS DO SEMIÁRIDO.* 2017, Fortaleza. **Anais...** Universidade Federal do Ceará, 2017.

RUBINSTEIN, R. Y.; KROESE, D. P. **Simulation and the Monte Carlo Method.** 2 ed. Haifa e Brisbane: John Wiley & Sons. 2007. 372 p.

SANTOS, C.A.; MANZI, A.O. Eventos extremos de precipitação no estado do Ceará e suas relações com a temperatura dos oceanos tropicais. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 26, n. 01, p. 157–165, 2011.

SANTOS, J. C. N. et al. Effect of dry spells and soil cracking on runoff generation in a semiarid micro watershed under land use change. **Journal of Hydrology**, v. 541, p. 1057–1066, 2016.

SCHULZ, K., BEVEN, K., HUWE, B. Equifinality and the problem of robust calibration in nitrogen budget simulations, **Soil Sci. Soc. Amer. J.** v. 63, n. 6, p.193-194. 1999.

SELBY, J., HOFFMANN, C. Beyond scarcity: rethinking water, climate change and conflict in the Sudans. **Global Environmental Change** v.29, p.360–370, 2014.

SHADEED, S.; ALMASRI, M. Application of GIS-based SCS-CN method in West Bank catchments, Palestine. **Water Science and Engineering**, v. 3, n. 1, p. 1–13, 2010.

SILVA, E. C.; NOGUEIRA, R. J. M. C.; AZEVEDO NETO, A. D.; BRITO, J. Z.; CABRAL, E. L. Aspectos ecofisiológicos de dez espécies em uma área de caatinga no município de Cabaceiras, Paraíba, Brasil. **Iheringia**, v.59, n.2, p. 201-205, 2004.

SILVA, F. S. G. da, **Aplicação do Método Monte Carlo para cálculos de dose em folículos tireoideanos.** 68 f. Dissertação (Mestrado em Biometria e Estatística Aplicada) – Departamento de Estatística e Informática – Universidade Federal Rural de Pernambuco. 2008.

SINGH, V. P. **Computer models of watershed Hydrology.** Baton Rouge: Water Resources Publications, 1995. 1130 p.

SINGH, J., KNAPP, H. V.; DEMISSIE, M. **Hydrologic modeling of the Iroquois River watershed using HSPF and SWAT.** ISWS CR 2004-08. Champaign, Illinois State Water Survey. 2004.

SOBRINHO, V. F.; RODRIGUES, J. O.; MENDONÇA, L. A. R.; ANDRADE, E. M. de; TAVARES, P. R. L. Desenvolvimento de equações Intensidade-Duração-Frequência sem dados pluviográficos em regiões semiáridas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, n.7, p.727–734, 2014.

SOIL CONSERVATION SERVICE. **National Engineering Handbook**, Supplement A, Section 4: Hydrology, USDA, Washington, DC. 1972.

SOULIS, K. X.; VALIANTZAS, J. D. SCS-CN parameter determination using rainfall-runoff data in heterogeneous watersheds – the two-CN system approach. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 16, p. 1001–1015, 2012.

SOUZA, R. O. R. de M.; SCARAMUSSA, P. H. M.; AMARAL, M. A. C. M. do; NETO, J. A. P.; PANTOJA, A. V.; SADECK, L. W. R. Equações de chuvas intensas para o estado do Pará. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, n.9, p.999–1005, 2012.

TAYFUR, G.; KAVVAS, M. L.; GOVINDARAJU, R. S.; STORM, D. E. Applicability of St. Venant equations for two-dimensional overland flows over rough infiltrating surfaces, **J. Hydraul. Eng.**, v. 119, n. 1, p. 51-63, 1993.

TEDELA, N. H.; McCUTCHEON, S.C.; RASMUSSEN, T.C.; HAWKINS, R. H.; SWANK, W. T.; CAMPBELL, J. L.; ADAMS, M. B.; JACKSON, C. R.; TOLLNER, E.W. Runoff curve numbers for 10 small forested watersheds in the mountains of the Eastern United States. **J. Hydrol. Eng.** v. 17, n. 11, p. 1188-1198, 2012.

THOMPSON, S. E.; KATUL, G. G.; PORPORATO, A. Role of microtopography in rainfall-runoff partitioning: An analysis using idealized geometry. **Water Resour. Res.**, v. 46, n. 7, p. 1-11, 2010.

TIAN, F.; LI, H.; SIVAPALAN, M. Model diagnostic analysis of seasonal switching of runoff generation mechanisms in the Blue River basin, Oklahoma. **Journal of Hydrology**. v. 418, p. 136 - 149, 2012.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. Porto Alegre. 2. ed. UFRGS. ABRH/UFRGS. 669 p. 2005.

VAN MULLEN, J. A. Runoff and Peak Discharges Using Green Ampt Infiltration Model. **Journal of Hydraulic Engineering**, v. 117, p. 354-370, 1991.

U.S. ARMY ENGINEER. **Program description and user manual for SSARR model-streamflow synthesis and reservoir regulation model**. Corps of Engineers, North Pacific Division, Department of the Army, Portland, Oregon. 1972.

VAN SCHAIK, N. L. M. B., SCHNABEL, S., JETTEN, V. G. The influence of preferential flow on hillslope hydrology in a semi-arid watershed (in the Spanish Dehesas). **Hydrological Processes**, v. 22, n. 1. p. 3844-3855. 2008.

VAN SCHAIK, N. L. M. B. et al. Linking spatial earthworm distribution to macropore numbers and hydrological effectiveness. **Ecohydrology**, v. 7, p. 401–408, 2014.

VRUGT, J. A.; GUPTA, H. V.; BOUTEN, W.; SOROOSHIAN, S. A shuffled complex evolution Metropolis algorithm for optimization and uncertainty assessment of hydrologic model parameters, **Water Resour. Res.**, v.39, n. 8, 2003.

WHEATER, H. S.; JAKEMAN, A. J.; BEVEN, K. J. Progress and directions in rainfall-runoff modelling. *In*: JAKEMAN, A. J.; BECK, M. B., McALEER, M. J. (eds.). **Modelling Change in Environmental Systems**. John Wiley & Sons, Chichester, UK, 1993.

WHEATER, H.; SOROOSHIAN, S.; SHARMA, K. D. **Hydrologic Modeling in Arid and Semi-Arid Areas**. 1. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2008.

WILLIAMS, J. R.; HANN, R. W. HYMO - a problem-oriented computer language for building hydrologic models. **Water Research Laboratory**, v.8, n.1, p.79-86. 1972.

WILLIAMS, J.R.; JONES, C.A.; DYKE, P.T. A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. **Transactions of ASABE**. v.27, p.129-144. 1984.

WOODWARD, D. E.; HAWKINS, R. H.; JIANG, R.; HJELMFELT, A. T.; VAN MULLEM, J. A.; QUAN, Q. D. Runoff Curve Number Method: Examination of the Initial Abstraction Ratio. *In*: Proceedings of the World Water and Environmental Resources Congress and Related Symposia. **Proceedings...** ASCE Publications: Philadelphia, PA. 2003.

WORD METEOROLOGICAL ORGANISATION. **Technical Material for Water Resources Assessment**. Geneva. Suíça. 2012. 111p.

XUE, L. et al. Hydrological simulation and uncertainty analysis using the improved TOPMODEL in the arid Manas River basin, China. **Nature - Scientific Reports**, v. 452, n. 8, p. 1–12, 2018.

YEVJEVICH, V. General Introduction to Application of Stochastic Hydrology in Water Resources. *In*: MARCO, J. B.; HARBOE, R.; SALAS, J. D. (eds.) **Water Resources Systems Simulation and Optimization**. Kluwer Academic Publishers. 1993.

YORIYAZ, H. Monte Carlo Method: principles and applications in Medical Physics. **Revista Brasileira de Física Médica**.v.3, n.1, p.141-149. 2009.

YU, B. Theoretical Justification of SCS Method for Runoff Estimation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 124, n. 6, p. 306–310, 1998.

YU, B. Validation of SCS method for runoff estimation ASCE, **Journal of Hydrologic Engineering**. v. 17, p. 1158-1163, 2012.

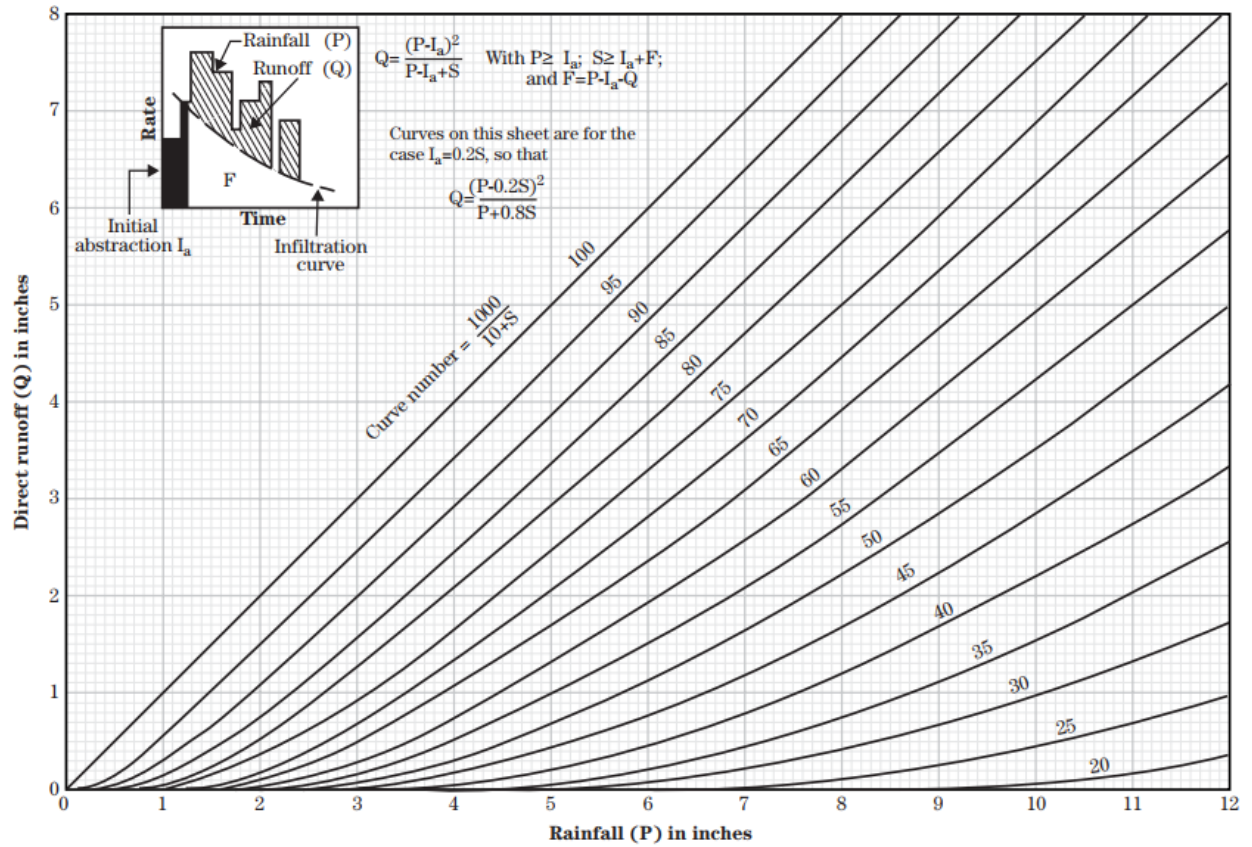
ZEMA, D. A. et al. Comparing Different Infiltration Methods of the HEC-HMS Model: The Case Study of the Mésima Torrent (Southern Italy). **Land Degradation and Development**, v. 28, n. 1, p. 294–308, 2017.

ZHAO, F. et al. Parameter Uncertainty Analysis of the SWAT Model in a Mountain-Loess

Transitional Watershed on the Chinese Loess Plateau. **Water**, v. 10, p. 1–16, 2018.

ZHAO, P. et al. Uncertainty of hydrological drought characteristics with copula functions and probability distributions: A case study of Weihe River, China. **Water**, v. 9, n. 5, 2017.

ANEXO A – SOLUÇÃO GRÁFICA PARA A EQUAÇÃO  $Q = \frac{(P - 0,2S)^2}{P + 0,8S}$



Fonte: Soil Conservation Service. National Engineering Handbook, Section 4 (NEH-4, 1972).

## ANEXO B – CN PARA TERRAS NÃO URBANAS (NEH-4, 1972)

covertype	Cover description treatment <sup>2/</sup>	hydrologic condition <sup>3/</sup>	-- CN for hydrologic soil group --			
			A	B	C	D
Pasture, grassland, or range- continuous forage for grazing <sup>4/</sup>		Poor	68	79	86	89
		Fair	49	69	79	84
		Good	39	61	74	80
Meadow-continuous grass, protected from grazing and generally mowed for hay		Good	30	58	71	78
Brush-brush-forbs-grass mixture with brush the major element <sup>5/</sup>		Poor	48	67	77	83
		Fair	35	56	70	77
		Good	30 <sup>6/</sup>	48	65	73
Woods-grass combination (orchard or tree farm) <sup>7/</sup>		Poor	57	73	82	86
		Fair	43	65	76	82
		Good	32	58	72	79
Woods <sup>8/</sup>		Poor	45	66	77	83
		Fair	36	60	73	79
		Good	30	55	70	77
Farmstead--buildings, lanes, driveways, and surrounding lots		---	59	74	82	86
Roads (including right-of-way):						
Dirt		---	72	82	87	89
Gravel		---	76	85	89	91

Fonte: Soil Conservation Service. National Engineering Handbook, Section 4 (NEH-4, 1972).

2/ A cobertura de resíduos de culturas aplica-se somente se os resíduos estiverem em pelo menos 5% da superfície ao longo do ano.

3/ A condição hidrológica é baseada em combinações de fatores que afetam a infiltração e o escoamento, incluindo (a) densidade e copa de vegetação (b) quantidade de cobertura durante todo o ano, (c) quantidade de gramíneas ou leguminosas (d) porcentagem de cobertura de resíduos na superfície > 20%) e (e) grau de tenacidade da superfície.

Ruim: Fatores impedem a infiltração e tendem a aumentar o escoamento.

Bom: Fatores promovem infiltração média e tendem a diminuir o escoamento.

Para a lavoura de condição hidrológica ruim, 5 a 20% da superfície é coberta com resíduos (menos de 750 libras por acre para plantações em fileiras ou 300 libras por acre para grãos pequenos).

Para a lavoura de boa condição hidrológica, mais de 20% da superfície é coberta com resíduos (maior que 750 libras) por acre para culturas em fileiras ou 300 libras por acre para grãos pequenos).

4/ Ruim: < 50% de cobertura do solo ou com muita pastagem, sem cobertura morta.

Médio: 50 a 75% de cobertura do solo e não muito úmido.

Bom: > 75% de cobertura do solo e levemente ou apenas ocasionalmente pastejado.

5/ Ruim: < 50% de cobertura do solo.

Médio: 50 a 75% de cobertura do solo.

Bom: > 75% de cobertura do solo.

6/ Se o número da curva real for menor que 30, use CN = 30 para cálculo de escoamento

7/ CNs calculados para áreas com 50% de florestas e 50% de pasto. Outras combinações de condições podem ser calculadas a partir dos CNs para florestas e pastagens.

8/ Ruim: serapilheira, pequenas árvores e arbustos são destruídos por pastoreio intenso ou queimadas regulares.

Médio: As florestas são pastoreadas, mas não queimadas, e alguma serapilheira cobre o solo.

Bom: As florestas são protegidas do pastoreio, e serapilheira cobre adequadamente o solo.