

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E
AMBIENTAL**

**ESTUDO HIDROLÓGICO DA BACIA DO RIO NEGRINHO – SC
UTILIZANDO O HEC-HMS**

RENE LEBARBENCHON MACEDO

Trabalho submetido à Banca Examinadora como parte dos requisitos para Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental – TCC II.

BANCA EXAMINADORA:

**Prof. Dr. Masato Kobiyama
(Orientador)**

**Roberto Fabris Goerl
(Co-orientador)**

**Prof. Dr. Davide Franco
(Membro da Banca)**

**FLORIANÓPOLIS, (SC)
MARÇO/ 2010**

AGRADECIMENTOS

Inicialmente apresento meus sinceros agradecimentos aos meus amigos e orientadores Roberto F. Goerl e Masato Kobiyama. A ajuda, paciência e disposição de ambos foram extremamente importantes para o desenvolvimento deste trabalho.

Em um âmbito mais abrangente, no que concerne a conclusão do curso de graduação como um todo, serei eternamente grato aos meus pais, avós e irmãos, cujas participações em minha vida foram (e são) essenciais para minha formação pessoal e acadêmica.

Na esfera de amizades gostaria de citar os nomes de Elisa, Abel, Gami, Mazzali, Olivas, Júlia e Otelino, por serem amigos de grande admiração.

RESUMO

Estudos hidrológicos envolvendo a quantificação das vazões máximas de projeto são uma das tarefas mais importantes da hidrologia, pois é através desta quantificação que se dimensionam todas as estruturas hidráulicas relacionadas com o ciclo hidrológico. Apesar da importância de tal estudo, muitas bacias hidrográficas no Brasil não possuem estações fluviométricas para medição de vazão. Neste caso, o cálculo das vazões máximas deve ser feito de forma indireta a partir de dados pluviométricos e através de modelos matemáticos de transformação de chuva em vazão. Um modelo matemático amplamente difundido para este fim é o HEC-HMS – *Hydrologic Modeling System* do *Hydrologic Engineering Center* dos Estados Unidos.

Tendo em vista que a bacia do Rio Negrinho não dispõe de estação fluviométrica automática, o objetivo deste trabalho foi construir hidrogramas sintéticos utilizando o HEC-HMS para determinar a relação chuva-vazão da bacia. Para isto, foram realizadas simulações de quatro eventos de chuva, cujos hidrogramas obtidos foram calibrados a partir da curva-chave. Os resultados mostraram hidrogramas sintéticos bem ajustados aos hidrogramas observados e, vazões de pico adequadamente calculadas, indicando que o modelo pode ser útil em projetos de obras hidráulicas de bacias que não possuem séries observadas de vazão. Entretanto, não foi possível determinar a relação chuva-vazão (validar os parâmetros de simulação), pois para isto deveriam ter sido avaliadas mais simulações, permitindo assim, encontrar valores médios dos parâmetros que produzissem hidrogramas sintéticos razoavelmente compatíveis com os observados.

Palavras-chave: Hidrograma sintético, simulação hidrológica, HEC-HMS.

ABSTRACT

Hydrologic studies involving peak discharges are very important because they are used for designing all the hydraulic structures. Although river flow observations are necessary for this use, there are not many watersheds in Brazil which are equipped with hydrologic stations capable of these measurements. In this case, peak discharges must be calculated with rainfall data and precipitation-runoff mathematical models. A well-known model developed for simulating this process is the HEC-HMS (*Hydrologic Engineering Center - Hydrologic Modeling System*).

Considering that there are not river discharge data with good quality in the Rio Negrinho Watershed, the objective of this paper was to determine the rainfall-runoff relationship using the HEC-HMS. This work was performed by estimating the discharge through the elevation-discharge curve and simulating four rainfall-runoff processes with HEC-HMS. The results show that the model was very good to calculate the peak flow, confirming that it can be useful for ungaged watersheds. However, in order to determine the best parameter values that would acceptably transform many different rainfall events into runoff it is necessary to execute more simulations with this model.

Key-words: Synthetic hydrograph, hydrologic simulation, HEC-HMS.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	6
2. OBJETIVOS	8
2.1. OBJETIVO GERAL	8
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	8
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
3.1. ENCHENTE E INUNDAÇÃO	9
3.2. MÉTODOS PARA ESTIMATIVA DE VAZÕES DE CHEIAS DE PROJETO... 10	
3.2.1. <i>Métodos Diretos</i>	12
3.2.2. <i>Métodos Indiretos</i>	12
3.3. MODELAGEM MATEMÁTICA	16
3.4. HEC-HMS	21
3.4.1. <i>Considerações Iniciais</i>	21
3.4.2. <i>Aplicação</i>	23
4. MATERIAIS E MÉTODOS	25
4.1. ÁREA DE ESTUDO.....	25
4.2. O PROGRAMA HEC-HMS	29
4.2.1. <i>Simulação Hidrológica</i>	29
4.2.2. <i>Procedimento</i>	32
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
5.1. HIDROGRAMAS SINTÉTICOS	37
5.2. PARÂMETROS DE SIMULAÇÃO	40
6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	45
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	47

1. INTRODUÇÃO

Um dos tipos de estudo hidrológico é aquele que têm por objetivo fornecer as vazões máximas a serem adotadas em projetos de obras hidráulicas, bem como determinar hidrogramas quando o interesse for dimensionar reservatórios de amortecimento de cheias; onde além da correta estimativa do pico de vazão, também é vital a determinação dos volumes associados (RAMOS *et.al.*, 1999; CANHOLI, 2005). A necessidade por um estudo hidrológico também pode ser originada no planejamento das planícies de inundação e no aproveitamento de recursos hídricos (FENDRICH, 2008).

A quantificação das vazões máximas de projeto, resultado do excesso de chuva sobre uma bacia, é uma das tarefas mais importantes da hidrologia, pois é através desta quantificação que se dimensionam e operam todas as estruturas hidráulicas relacionadas com o ciclo hidrológico. Dentre tais estruturas citam-se diques, muros de contenção, vertedores de barragens, túneis, canais de desvio, bueiros, e galerias de drenagem. Apesar da importância de tal aspecto hidrológico, muitas bacias hidrográficas no Brasil não possuem estações fluviométricas para medição de vazão.

A inexistência de séries observadas de vazões afluentes em pontos de interesse da bacia hidrográfica impossibilita o emprego de métodos diretos para estimativa de vazões. Neste caso, o cálculo deve ser feito de forma indireta a partir de dados pluviométricos e através de modelos matemáticos de transformação de chuva em vazão (CANHOLI, 2005; FENDRICH, 2008). Os hidrogramas obtidos de forma indireta são denominados sintéticos, e sua determinação requer essencialmente características geomorfológicas da bacia, suas condições de impermeabilização, tempos de concentração, bem como as precipitações de projeto (CANHOLI, 2005).

A Bacia Hidrográfica do Rio Negrinho (BHRN), assim como muitas outras bacias, não possui estação fluviométrica automática e conseqüentemente não se conhece o hidrograma detalhado. Segundo Herrmann *et al.* (2007) e Marcelino *et al.* (2004), o município de Rio Negrinho possui uma alta frequência na ocorrência de inundações bruscas e graduais e, portanto, a simulação hidrológica da bacia utilizando um modelo matemático contribuiria para um melhor entendimento do comportamento da bacia em função das precipitações.

Um modelo matemático amplamente utilizado e difundido no cenário da hidrologia e, cuja aplicação destina-se a transformações chuvavazão é o HEC-HMS (*Hydrologic Modeling System* do *Hydrologic En-*

gineering Center dos Estados Unidos). Neste contexto, simulações hidrológicas utilizando este modelo seriam importantes para construir hidrogramas sintéticos e determinar a relação chuva vazão para a bacia do Rio Negrinho, fornecendo informações valiosas quanto ao volume de cheia esperado e ao pico de vazão em função da chuva. Caso seja encontrada uma relação bem ajustada, a mesma poderá ser utilizada para obtenção de hidrogramas de projeto para chuvas intensas com diversos tempos de recorrência.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Estruturar a relação chuva-vazão na bacia hidrográfica do Rio Negrinho utilizando o HEC-HMS.

2.2. Objetivos específicos

- Simular hidrogramas sintéticos associados a diferentes eventos de chuva;
- Compará-los aos respectivos hidrogramas observados;
- Ajustar os parâmetros de simulação;

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Enchente e Inundação

As enchentes de um curso d'água, de magnitude e data de ocorrência aleatórias, podem provocar inundações, prejuízos, perdas de vidas e podem representar um grande risco para estruturas hidráulicas ali situadas. O estudo das vazões de enchentes é necessário para o dimensionamento de vertedouros de barragens, canais, bueiros, galerias de drenagem, seção de vazão de pontes, alturas de diques, determinação do volume de controle de cheias em barragens, bem como o planejamento da ocupação de planícies de inundação (NAGHETTINI, 1999).

Segundo Gontijo (2007), as enchentes são fenômenos temporários que correspondem à ocorrência de vazões elevadas num curso de água, com eventual inundação dos seus terrenos marginais. Isto é o resultado da combinação de chuvas intensas ou de longa duração com as características físicas da bacia hidrográfica (capacidade infiltração dos solos, por exemplo). Quando a precipitação é intensa a quantidade de água que chega ao rio pode ser superior à sua capacidade de drenagem, e então ocorre o transbordamento do corpo hídrico e a água passa a ocupar a área do seu leito maior (COLLISCHONN & TASSI, 2008).

O transbordamento das águas de rios é um fenômeno comum e que ocorre naturalmente de tempos em tempos. O registro de inundações remonta desde o início das primeiras civilizações, que sabendo de tais acontecimentos, não ocupavam as áreas sobre as quais a água invadia em épocas de cheias. As inundações somente passaram a se configurar num problema quando, em função do crescimento desordenado das cidades, as populações passaram a ocupar as planícies de inundação. Conseqüentemente, em períodos de picos de cheia dos rios, a água invade as áreas urbanizadas/ocupadas causando inúmeros prejuízos econômicos, sociais, ambientais e à vida humana.

Um fator agravante deste problema se deve a impermeabilização do solo, que em função da ocupação urbana, a água é impedida de se infiltrar, aumentando ainda mais a magnitude da vazão de escoamento superficial. Outro fator importante é a frequência das inundações, que quando pequena a população despreza o risco, aumentando significativamente a ocupação das áreas inundáveis (TUCCI, 1997), podendo desencadear situações graves de calamidade pública.

Para se proteger das enchentes e inundações existem fundamentalmente duas formas: as medidas estruturais e não-estruturais (RAMOS *et al.*, 1999). Enquanto as primeiras visam reduzir o risco de enchentes,

as segundas visam reduzir os potenciais danos causados durante o fenômeno (HELLER & PÁDUA, 2006). Dentre as medidas estruturais podemos citar diques, cortes de meandros, aumento da capacidade de descarga dos rios, reservatórios, bacias de amortecimento e canais de desvio. Já entre as medidas não-estruturais cita-se o zoneamento de áreas inundáveis e sistemas de previsão e alerta

Conforme Naghettini (1999) e Heller & Pádua (2006), a magnitude e previsão de uma cheia pode ser avaliada em curto prazo ou em longo prazo. A previsão de cheia em curto prazo, ou em tempo-real, depende da previsão da precipitação, cuja antecedência é de poucos dias ou horas. Uma vez iniciada a chuva, o tempo máximo possível de previsão da cheia é limitado pelo tempo médio de deslocamento da água na bacia até a seção de interesse (tempo de concentração). Este tipo de previsão é utilizado para alertar a população ribeirinha e operadores de obras hidráulicas.

A previsão de cheia em longo prazo quantifica estatisticamente a possibilidade de ocorrência da enchente, sem precisar quando esta ocorrerá. A previsão em longo prazo se baseia na estatística de ocorrência de níveis no passado e permite estabelecer os níveis de cheia para alguns riscos escolhidos (HELLER & PÁDUA 2006).

De acordo com Gontijo (2007), uma das dificuldades de se prever a ocorrência de cheias se deve a aleatoriedade das inter-relações dos fenômenos que a provocam. O período de retorno de uma cheia não é, necessariamente, o mesmo da chuva que a gerou, pois depende, entre outros fatores, da capacidade de infiltração do solo, da cobertura vegetal e do estado de umidade do solo. Entretanto, na prática, tendo em vista a dificuldade de estabelecer a ordem de grandeza dessa probabilidade, a cheia causada por um episódio de precipitação é simplesmente considerada de mesma frequência.

Tendo em vista que este trabalho envolve a estimativa de diferentes vazões sem precisar sua data de ocorrência, serão descritos a seguir os métodos correlatos à este fim. Dentre os diversos métodos de determinação de cheia em longo prazo comumente aplicados podem ser citados os métodos diretos e indiretos.

3.2. Métodos para Estimativa de Vazões de Cheias de Projeto

Segundo Gontijo (2007), a determinação de cheias é um processo complexo por se tratar de um fenômeno natural e por envolver diversos fatores intervenientes. Dentre estes, as principais variáveis hidrológicas que caracterizam o comportamento hidrológico da bacia são: capacidade

de infiltração, porcentagem de escoamento básico, descarga superficial, tempo de armazenamento superficial e índice de umidade do solo, sendo esta última variável essencial, pois controla a fração de chuva que infiltra, esco superficialmente, ou evapora pela superfície e camadas superficiais do solo.

De acordo com a disponibilidade dos dados hidrológicos pode-se utilizar diversos métodos para determinação do escoamento superficial. Fundamentalmente, os métodos de quantificação de cheias podem ser diretos, quando se baseiam apenas nos registros fluviométricos, ou indiretos, quando usam os registros pluviométricos (para construção da chuva de projeto) e uma técnica de transformação de chuva-vazão (NAGHETTINI, 1999; GONTIJO, 2007).

A Figura 1 apresenta a evolução do uso dos métodos diretos e indiretos no Brasil. Nota-se que a partir da década de 70 houve uma inversão no emprego dos métodos utilizados. Isto ocorreu provavelmente porque nesta época o Brasil vivia um período de grande crescimento econômico, o que implicou em projetos de obras hidráulicas, pontes e rodovias em bacias hidrográficas sem a disponibilidade de dados de vazão, forçando o uso de métodos indiretos.

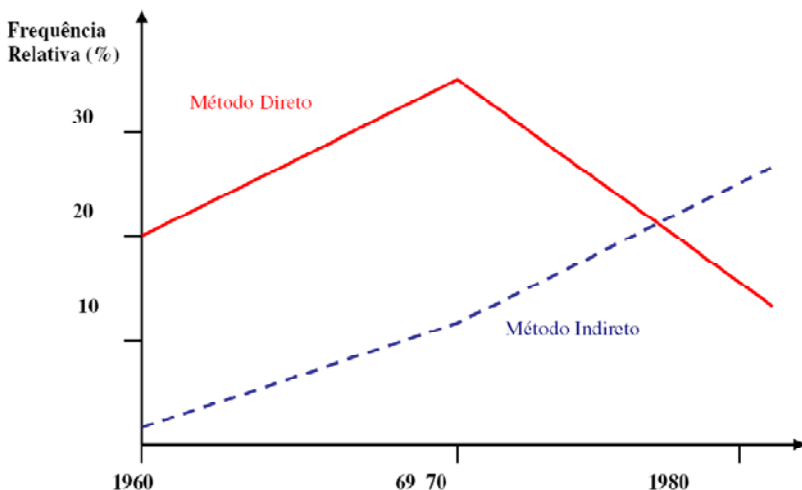


Figura 1. Evolução do uso dos métodos diretos e indiretos no Brasil (NAGHETTINI, 1999).

3.2.1. Métodos Diretos

Os métodos diretos são aqueles que utilizam exclusivamente os registros fluviométricos obtidos na bacia hidrográfica para estimar as vazões de projeto por meio de distribuições estatísticas de probabilidade. Esses métodos só devem ser utilizados quando existem dados históricos de vazão e as condições da bacia hidrográfica não se modificaram substancialmente no período da série histórica (GONTIJO, 2007).

A análise de frequência é o método direto mais utilizado no prognóstico de enchentes, empregando diretamente as séries de vazões em locais que possuem estações fluviométricas. A partir de uma amostra, procura-se inferir a distribuição de probabilidades, adotando funções de densidade de probabilidade teóricas com posterior comparação com frequências amostrais. O procedimento de cálculo é o seguinte (NAGHETTINI, 1999):

- Seleção do histórico de vazões;
- Obtenção da amostra de máximos anuais;
- Ordenação dos valores e cálculo das frequências amostrais;
- Cálculo das estatísticas amostrais: média, desvio padrão e coeficiente de assimetria;
- Seleção de distribuição de probabilidades;
- Estimativa dos parâmetros das distribuições ou do fator de frequência: método dos momentos, métodos da máxima verossimilhança e fator de frequência k ;
- Verificação da adequação do ajuste: testes de aderência, tais como os testes do Qui-Quadrado, de Kolmogorov-Smirnov e de Filliben;
- Cálculo dos quantis.

3.2.2. Métodos Indiretos

A maioria das bacias hidrográficas raramente possui dados observados de vazão e nível de água. Assim, a estimativa de vazões extremas nestas bacias não pode ser feita usando os métodos estatísticos tradicionais. Para contornar este problema, costuma-se utilizar métodos de estimativa de vazões máximas a partir das características locais das chuvas intensas (COLLISCHONN & TASSI, 2008).

Os métodos chamados indiretos calculam as vazões de enchente a partir da chuva e, geralmente, consistem numa alternativa viável para este fim (FENDRICH, 2008). Atribui-se um tempo de recorrência para a

determinação da chuva crítica e um método de transformação chuva-vazão é utilizado para calcular a correspondente vazão de projeto.

Os métodos indiretos são empregados em locais onde não existem registros de vazões observadas, ou existem em pouca quantidade. Como a ausência destes dados é bastante frequente, a utilização destes métodos é amplamente necessária. O princípio é obtenção de vazões de projeto a partir dos dados de chuva, os quais são, em geral, menos escassos do que os dados de vazão (CANHOLI, 2005).

Os métodos indiretos podem ainda ser classificados em 4 grupos principais (NAGHETTINI, 1999): fórmulas empíricas (em desuso), método racional, método do hidrograma unitário e, simulação hidrológica por modelos conceituais de precipitações máximas. Segundo este mesmo autor, a escolha do método depende de vários fatores: objetivo a ser alcançado, dados disponíveis, importância do projeto e suas consequências, e a superfície e as características da bacia. A Tabela 1 apresenta a recomendação dos métodos para determinação de cheias de projeto de acordo com a área de drenagem da bacia hidrográfica.

Tabela 1. Métodos indiretos em relação a área da bacia.

Área da bacia (km²)	Métodos usualmente aplicados
Menor que 2,6	Método Racional
2,6 – 260	Hidrograma Unitário, Métodos Estatísticos
260 – 5200	Hidrograma Unitário, Métodos Estatísticos
Maior que 5200	Métodos estatísticos, Simulação de Vazões

Fonte: Adaptado de NAGHETTINI (1999).

Baseado nas informações da Tabela 1 e, tendo em vista que a bacia hidrográfica do Rio Negrinho possui uma área de 195,08 km², observa-se que existem dois métodos indiretos diferentes para estimativa das vazões máximas (hidrograma unitário e métodos estatísticos). Dentre estes, o único que consta no modelo matemático HEC-HMS é o método do hidrograma unitário e, por isto, seus conceitos serão descritos no item a seguir.

3.2.2.1. Método do Hidrograma Unitário e Hidrograma Unitário Sintético

O hidrograma unitário (HU), proposto originalmente por Sherman (1932), é um modelo linear de transformação de chuva efetiva em vazão superficial (RAMOS *et al.* 1989). Este modelo refere-se ao hidrograma resultante de uma precipitação efetiva de altura unitária, com intensidade constante no tempo, e uniformemente distribuída sobre a área de drenagem da bacia.

Além das considerações citadas acima (chuva de intensidade constante e uniformemente distribuída sobre a bacia), o método baseia-se na hipótese de que uma vez que as características físicas da bacia não se alterem, precipitações semelhantes produzirão hidrogramas semelhantes (NAGHETTINI, 1999). O HU seria o hidrograma típico para uma bacia hidrográfica.

Entre muitos autores, a teoria envolvida no Hidrograma Unitário pode ser encontrada em Ramos *et al.* (1989), Tucci (1997) e Porto *et al.* (1999), e pode ser resumida da seguinte maneira:

- **1º Princípio:** Constância do Tempo de Base (linearidade): chuvas efetivas de igual duração apresentarão hidrogramas superficiais de iguais durações e com as ordenadas proporcionais aos volumes (Figura 2).

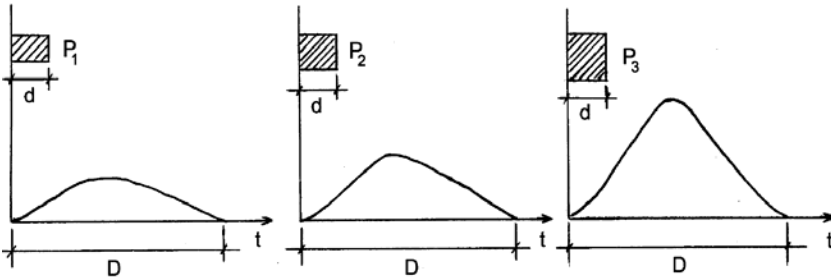


Figura 2. Princípio da Constância do Tempo de Base (linearidade) (GONTIJO, 2007).

- **2º Princípio:** Proporcionalidade: Chuva de mesma duração, mas com alturas diferentes resultam em hidrogramas cujas ordenadas são proporcionais aos volumes escoados (Figura 3).

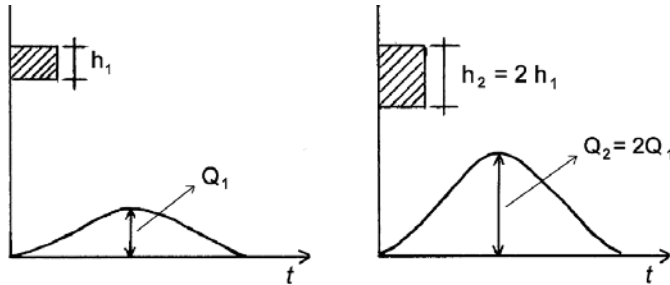


Figura 3. Princípio da Proporcionalidade (GONTIJO, 2007).

- 3º Princípio:** Independência de Eventos (aditividade ou invariância no tempo): A duração do escoamento superficial de uma determinada chuva efetiva não depende de precipitações anteriores; ou seja, a mesma chuva efetiva produzirá, a qualquer tempo, sempre um mesmo hidrograma superficial, desde que as condições da bacia antecedentes às chuvas sejam iguais. Isto implica que o hidrograma total referente a duas ou mais chuvas efetivas é obtido adicionando-se as ordenadas de cada um dos hidrogramas em tempos correspondentes (Figura 4).

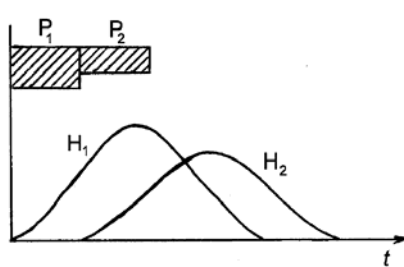


Figura 4. Princípio da Independência de Eventos (aditividade ou invariância no tempo). (GONTIJO, 2007)

Segundo Porto *et al.* (1999), o HU é um dos métodos mais práticos disponíveis para determinar a relação entre a precipitação e o hidrograma resultante. Ramos *et al.* (1989) expõe ainda, que apesar das limitações do HU, este é um método bastante utilizado na engenharia.

As principais limitações do HU se referem às considerações de precipitações homogêneas, de a área da bacia estar uniformemente coberta pela precipitação e, as características físicas do escoamento serem invariantes (NAGHETTINI, 1999; GONTIJO, 2007).

No que tange à determinação do HU, destaca-se que são necessários registros simultâneos de chuva e vazão, pois o procedimento consis-

te em relacionar estas duas grandezas. Sabendo-se que os registros fluviométricos nem sempre estão disponíveis para determinadas regiões, foram estabelecidos outros métodos que pudessem determinar hidrogramas unitários a partir das características físicas da bacia hidrográfica: os chamados **hidrogramas unitários sintéticos** (RAMOS *et. al.*, 1989).

Segundo Canholi (2005), qualquer hidrograma obtido de forma indireta é denominado sintético. Para sua determinação são necessárias fundamentalmente as características hidráulicas e geomorfológicas da bacia, suas condições de impermeabilização, tempos de concentração, bem como as precipitações de projeto. Em linhas gerais, pode-se afirmar que um HU sintético relaciona parâmetros de um HU paramétrico com as características físicas da bacia hidrográfica (PORTELA, 2006).

Existem muitas técnicas sintéticas de hidrogramas unitários abordadas pelos mais diversos autores: Método de Nash, Clark, de Santa Bárbara, da Convolução Contínua, Snyder, SCS (*Soil Conservation Service*) e, CUHP (*Colorado Urban Hydrograph Procedure*). Dentre os hidrogramas sintéticos mais conhecidos e que constam no modelo HEC-HMS destacam-se o Método de Snyder, de Clark e do SCS.

Segundo Collischonn & Tassi (2008), hidrogramas unitários sintéticos formam a base de muitos modelos matemáticos hidrológicos amplamente utilizados para calcular vazões máximas de projeto, e tem funcionado relativamente bem. Entretanto, boa parte das premissas utilizadas não são inteiramente corretas: tempo de base igual; chuva efetiva gerada uniformemente na bacia; chuva efetiva gerada de forma idêntica em todos os eventos; linearidade.

Os autores apontam também que o escoamento não é gerado de forma uniforme em toda a bacia. As áreas preferenciais de geração de escoamento são as áreas impermeabilizadas por ação do homem ou as áreas com solos saturados ou próximos da saturação localizadas na região próxima à rede de drenagem. Ainda, o escoamento ocorre mais rapidamente para eventos maiores do que para eventos menores. Assim a linearidade não se mantém.

3.3. Modelagem Matemática

Os cálculos de vazão máxima a partir da chuva e do HU, descritos anteriormente, raramente são realizados de forma manual, ou com base em planilhas e calculadora. A situação mais normal atualmente é a utilização de modelos hidrológicos para a realização destes cálculos (COLLISCHONN & TASSI, 2008). Os modelos hidrológicos utilizam técnicas para calcular as vazões a partir da chuva. Além de separação de

escoamento e hidrograma unitário, os modelos hidrológicos ainda permitem fazer os cálculos de propagação de escoamento em rios e reservatórios.

Conforme Christofolletti (1999), modelo é qualquer representação simplificada da realidade ou de um aspecto do mundo real que possibilite prever um comportamento, uma transformação ou uma evolução. Desta forma, o objetivo da modelagem é representar a realidade para entendê-la e prevê-la. No entanto, a realidade é complexa e apenas parcialmente conhecida. Tal complexidade se deve à heterogeneidade da bacia e, à natureza contínua e aleatória dos fenômenos hidrológicos e, cuja compreensão parcial é geralmente devida às limitações das técnicas de monitoramento no tempo e no espaço (GONTIJO, 2007)

Os modelos usualmente são classificados em: físicos, analógicos e matemáticos (JANZEN, 2007). Os modelos físicos representam o sistema por meio de um protótipo em escala menor. Os modelos analógicos valem-se da analogia entre processos físicos – por exemplo, a analogia entre as equações do escoamento hidráulico e de um circuito elétrico que permite a representação do sistema hidráulico através de um circuito elétrico, que tem um custo mais reduzido. Finalmente, os modelos matemáticos, também chamados de digitais, representam a natureza do sistema através de equações matemáticas.

Segundo Kobiyama & Manfroi (1999) e, Janzen (2007), os modelos matemáticos são mais versáteis, pois se pode facilmente modificar a sua lógica, obtendo-se resultados de diferentes situações de um mesmo sistema ou de diferentes sistemas, além da grande velocidade de resposta. A desvantagem desse tipo de modelo está na discretização de processos contínuos e na dificuldade na representação matemática de alguns processos físicos.

Os modelos matemáticos, dentre o qual se inclui o HEC-HMS, podem ser classificados segundo os seguintes critérios (USACE-HEC, 2000; GONTIJO, 2007): quanto à forma de representação dos dados (discretos ou contínuos); quanto à concentração espacial dos processos hidrológicos (concentrados ou distribuídos); quanto ao tipo de relação entre as variáveis (empíricos ou conceituais); e, quanto ao tipo de variáveis utilizadas na modelagem (estocásticos ou determinísticos). A Tabela 2 apresenta estes conceitos em maiores detalhes.

Tabela 2. Classificação de modelos matemáticos com ênfase no HEC-HMS.

Categoria	Descrição
Discreto ou Contínuo:	Um modelo é dito contínuo quando os fenômenos são contínuos no tempo, e discreto em caso contrário. A maioria dos sistemas hidrológicos é contínuo, porém são representados por modelos discretos. Esta distinção se aplica essencialmente nos processos de escoamento superficial da bacia. Um modelo discreto simula um único evento de chuva, cuja duração pode variar de algumas horas a alguns dias. Um modelo contínuo simula um período mais longo, prevendo o comportamento da bacia tanto durante a chuva como entre os eventos de precipitação. A maioria dos modelos incluídos no HEC-HMS são discretos.
Concentrado ou distribuído:	Um modelo é concentrado quando não leva em conta a variabilidade espacial (esta é representada por um único valor médio) e utiliza somente o tempo como variável independente. É aplicado em bacias pequenas, onde a distribuição espacial das variáveis não compromete os resultados do estudo. Um modelo é dito distribuído quando as variáveis e parâmetros do modelo dependem do espaço e/ou do tempo. Somente o modelo distribuído permite estudar a variabilidade do comportamento físico de diferentes partes do sistema. O HEC-HMS envolve basicamente modelos concentrados, com exceção do ModClark.
Empírico ou Conceitual:	Modelo conceitual é aquele cujas funções utilizadas na sua elaboração consideram formulações físicas parametrizáveis e/ou empíricas e, portanto, pelo menos um parâmetro exige calibração. Os modelos empíricos (caixa-preta) são aqueles que ajustam os valores calculados aos dados observados através de funções que não têm nenhuma relação com os processos físicos envolvidos. São úteis e simples, porém pouco robustos, pois são específicos para situação em que foram aferidos. O HEC-HMS inclui ambos os modelos. Por exemplo, o hidrograma unitário de Snyder é empírico, pois o modelo é ajustado com dados observados de chuva e vazão. Já o modelo de onda cinemática é conceitual, pois é baseado nos fundamentos do escoamento superficial em águas rasas.
Determinístico ou Estocástico:	Esta é uma das principais classificações dentro da simulação hidrológica. 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 (variáveis aleatórias). De outro lado, se a probabilidade de ocorrência das variáveis envolvidas no processo é ignorada, o modelo e o processo são ditos determinísticos. Nos modelos determinísticos existe uma relação direta entre causa e efeito, ou seja, a entrada define a saída do sistema. Todos os modelos incluídos no HEC-HMS são determinísticos.

Fonte: USACE-HEC, 2000.

Os principais tipos de modelos usados em problemas relacionados a recursos hídricos são diferenciados de acordo com os processos físicos representados. Assim, os modelos correlatos a este tema podem ser reunidos em 3 grupos diferentes: hidrodinâmicos, de qualidade de água e hidrológicos (GONTIJO, 2007).

Segundo Oliveira (2003), a finalidade de um modelo hidrológico é determinar os componentes do ciclo hidrológico em uma bacia hidrográfica e estimar o comportamento da água e a magnitude das variáveis envolvidas.

Os modelos hidrológicos podem ainda ser de diferentes tipos e são desenvolvidos para diferentes propósitos, contudo, muitos modelos compartilham similaridades estruturais. A Tabela 3 apresenta diversos modelos envolvidos no gerenciamento de recursos hídricos.

Tabela 3. Modelos hidrológicos utilizados no gerenciamento dos recursos hídricos.

Nome	Tipo	Objetivo	Características	Usos
Precipitação-Vazão	Determinístico; Empírico; Conceitual;	Comportamento	Calcula a vazão de uma bacia a partir da precipitação	Extensão de séries de vazão; dimensionamento; previsão em tempo atual, avaliação do uso da terra
Vazão-Vazão	Determinístico: empírico; Conceitual;	Comportamento	Calcula a vazão de uma seção a partir de um ponto a montante	Extensão de séries de vazões; dimensionamento; previsão de cheia
Geração estocástica de vazão	Estocástico	Comportamento	Calcula a vazão com base nas características da série histórica	Dimensionamento do volume de um reservatório

Nome	Tipo	Objetivo	Características	Usos
Fluxo saturado	Determinístico	Comportamento	Determina o movimento, vazão potencial de águas subterrâneas a partir de dados de realimentação, bombeamento, etc.	Capacidade de bombeamento; nível do lençol freático; iteração rio-aquífero, etc.
Hidrodinâmico	Determinístico	Comportamento	Sintetiza vazões em rios e rede de canais; Calcula as características hidráulicas.	Simulação de alterações do sistema; efeitos de escoamento de jusante
Qualidade de água de rios e reservatórios	Determinístico	Comportamento	Simula a concentração de parâmetros de qualidade de água	Impacto de efluentes; eutrofização de reservatórios; condições ambientais
Rede de canais e condutos	Determinístico	Comportamento e otimização	Otimiza o diâmetro dos condutos e verifica as condições de projeto	Rede de abastecimento de água; rede de irrigação
Operação de reservatórios	Estocástico; Determinístico	Otimização	Determina a operação ótima de sistemas de reservatórios	Usos múltiplos
Planejamento e gestão de sistemas múltiplos	Estocástico; Determinístico	Comportamento, otimização e planejamento	Simula condições de projeto e operação de sistemas (usa vários modelos)	Reservatórios; canais; estações de tratamento; irrigação; navegação fluvial; etc.

Fonte: TUCCI, 1998.

Conforme Gontijo (2007), um dos modelos mais comuns é o do tipo chuva-vazão, que trata da conversão da chuva em escoamento fluvial e, é utilizado na simulação e previsão de séries temporais de vazão a partir de séries de precipitação.

O modelo utilizado neste trabalho compõe justamente o tipo hidrológico supracitado (chuva-vazão) e será abordado em detalhes no item 3.4.

3.4. HEC-HMS

3.4.1. Considerações Iniciais

O modelo hidrológico HEC-HMS – *Hydrologic Modeling System* foi um software desenvolvido pelo Centro de Engenharia Hidrológica do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (USACE – U.S. Army Corps of Engineers), e é utilizado para modelar processos de chuva-vazão em bacias hidrográficas (USACE-HEC, 2008a). Através da simulação do comportamento hidrológico da bacia, o modelo gera hidrogramas e informações quanto ao volume de deflúvio, vazão de pico e tempo de escoamento, que podem ser usados para diversos fins: drenagem urbana, disponibilidade hídrica, impacto de urbanização, dimensionamento de vertedores em barragens, etc (USACE-HEC, 2008b).

Considerando os critérios da Tabela 2, apresentada no item 3.3, o HEC-HMS é um modelo matemático discreto, concentrado, empírico/conceitual, e determinístico.

O funcionamento e as características do modelo estão descritas em várias publicações disponibilizadas pelos seus idealizadores (USACE-HEC, 2008), porém o modelo ainda apresenta algumas deficiências quanto à facilidade de manipulação pelo usuário (MILDE *et al.*, 2002). Segundo Tavares & Castro (2005), apesar de o HEC-HMS se apresentar como uma ferramenta computacional simplificadora para o processo de cálculo do hidrograma, isto não deixa de exigir do profissional operador, experiência e sensibilidade quanto aos métodos a serem adotados.

Na Figura 5 observam-se os principais dados e etapas no processo de modelagem do HEC-HMS.

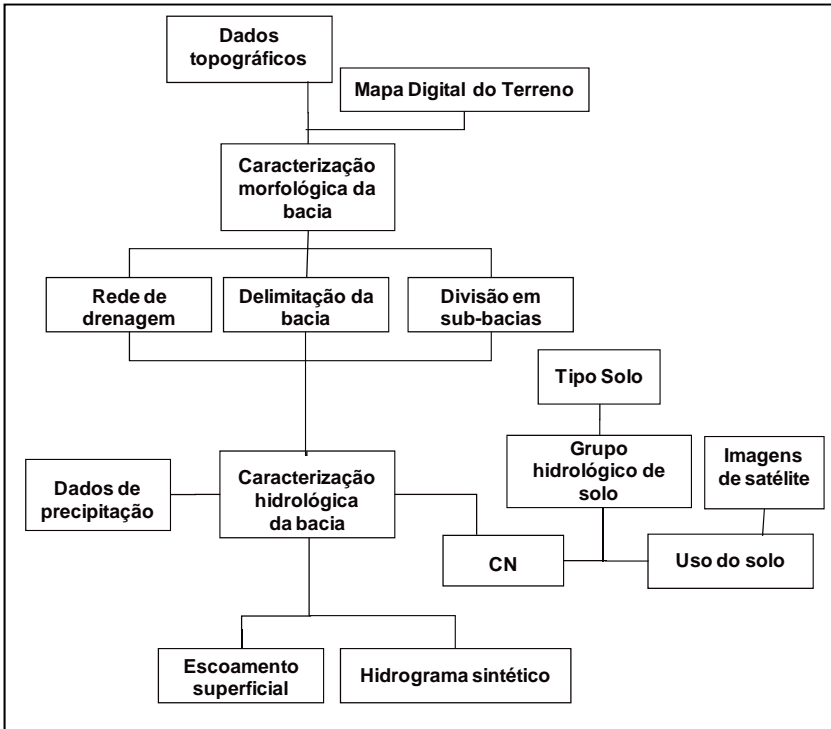


Figura 5. Fluxograma do processo de modelagem hidrológica utilizando o HEC-HMS. (Adaptado de Hammouri & El-Naqa 2007).

Resumidamente, o modelo HEC-HMS é constituído por três componentes: o Modelo de Bacia, o Modelo Meteorológico, e as Especificações de Controle (USACE-HEC, 2008a).

Segundo Tavares & Castro (2005), o processamento do modelo hidrológico no HEC-HMS requer inicialmente a entrada de dados da bacia hidrográfica, bem como dados meteorológicos. Posteriormente, são escolhidos os métodos para o cálculo das perdas, de transformação chuva-vazão, de composição do escoamento de base, de propagação em rios; considerando parâmetros relacionados a tais métodos, como a área das sub-bacias, tempo de concentração, fatores de perda por infiltração, evapotranspiração, e perdas em sumidouros.

Estes mesmos autores relatam que a composição de um projeto no HEC-HMS é realizada de maneira modular, em que conjuntos de dados podem ser independentemente manipulados, mas que respeitam

uma seqüência de acionamento para a realização de simulações. As informações são, então, agrupadas nos três componentes supracitados:

a) Modelagem da bacia hidrográfica: nesta categoria são inseridos e manipulados os dados referentes à geometria da bacia hidrográfica, sendo representado o esquema hidrológico da área, com as sub-bacias, os trechos de rios, possíveis reservatórios, junções e divisões dos canais. Inclui, neste componente, a definição dos métodos e respectivos parâmetros referentes a perda por infiltração, evaporação, interceptação, os métodos de transformação chuva-vazão, de cálculo do escoamento de base e propagação em rios;

b) Modelagem meteorológica: constitui na entrada dos dados de precipitação e evapotranspiração, sendo selecionado o método de distribuição temporal destes;

c) Especificações de controle: refere-se aos períodos de tempo para os quais serão realizados os cálculos, incluindo data e horário de início e fim do determinado período, bem como o intervalo ou “passo” de computação dos dados.

Conforme Milde *et al.* (2002), o modelo assume que uma bacia hidrográfica é reproduzida como um grupo interligado de áreas, e os processos hidrológicos podem ser representados pelos parâmetros que refletem as condições médias dentro da área. Se essas médias não forem apropriadas para uma sub-área, será necessário considerar sub-áreas menores, nas quais os dados médios possam ser aplicados. Os autores apontam ainda algumas limitações do modelo como: a) as simulações devem preferencialmente referir-se a eventos isolados de chuva devido ao fato de não ser feita nenhuma provisão para recuperação da umidade do solo durante períodos sem precipitação; b) os resultados do modelo são em termos de descarga; c) o direcionamento da onda de cheia é calculado por métodos de direcionamento hidrológico e não refletem as equações de St. Venant.

3.4.2. Aplicação

O HEC-HMS é um modelo numérico que inclui uma grande variedade de métodos para simular o comportamento hidrológico de bacias hidrográficas e canais. Tal simulação é feita através de processos de transformação de chuva em vazão (USACE-HEC, 2008b). Dentro deste contexto, o modelo foi inicialmente desenvolvido para suprir estudos conduzidos pelo próprio *Hydrologic Engineering Center* (HEC), tais

como: inundações em centros urbanos, frequência de inundações, perdas por enchentes e, dimensionamento e operação de reservatórios.

Uma vez que o modelo apresenta resultados satisfatórios em termos de simulação de vazões e no traçado da hidrografa (MILDE *et al.*, 2002; e YU *et al.*, 1999 e 2002; MOGES *et al.*, 2003; FLEMING & NEARY, 2004; CUNDERLIK & SIMONOVIC, 2007), diversas pesquisas têm sido conduzidas com sua utilização. A Tabela 4 apresenta alguns estudos que utilizaram o modelo HEC-HMS em combinação com outros modelos.

Tabela 4. Pesquisas envolvendo a utilização do modelo HEC-HMS

Autor	Modelo	Objetivo
Oliveira (2003)	HEC-HMS, HEC-RAS, SIG	Determinar planos de inundação para chuvas com período de retorno de 10, 50 e 100 anos.
Benavides <i>et al.</i> (2001)	HEC-HMS, HEC-RAS, HEC-GeoRas, SIG e NEXRAD	Testar a eficiência de alternativas de controle de inundações.
Caçada <i>et al.</i> (2003)	HEC-HMS, HEC-RAS, SIG	Caracterizar cheias no território de Timor Leste.
Fiuza (2008)	HEC-HMS, HEC-RAS, SIG	Delimitar as zonas inundáveis num trecho do rio Ribeira de Asseca.
Medeiros <i>et al.</i> (2005)	HEC-HMS e HEC-RAS	Avaliar a eficiência de obras para contenção de cheias.
Pistocchi & Mazzoli (2002)	HEC-HMS, HEC-RAS, SIG	Discutir o uso do pacote HEC HMS e HEC-RAS para apoio a tomada de decisão para prever o efeito de inundações.
Tavares & Castro (2005)	HEC-HMS, HEC-RAS, SIG	Simular planícies de inundação relacionadas a diferentes cenários de urbanização.
YENER <i>et al.</i> (2007)	HEC-GeoHMS, HEC-HMS	Fornecer uma ferramenta de apoio a decisão para operação e gerenciamento da barragem Yuvacik, Turquia.
Hammouri & El-Naqua (2007)	HEC-HMS e SIG	Simular o processo de chuva-vazão para uma bacia desértica sem medições.
Milde <i>et al.</i> (2002)	HEC-HMS	Testar o modelo HEC-HMS na geração de hidrogramas para a sub-bacia de Analândia.

Na Tabela 4 observa-se que a maioria dos estudos não envolve somente a aplicação do modelo HEC-HMS. O que normalmente acontece é a utilização deste para gerar informações que serão usadas posteriormente por outros programas. Essencialmente, o HEC-HMS fornece hidrogramas, cujas informações correlatas (volume do escoamento superficial direto, volume do escoamento de base, picos de vazão e tempo de descarga) servem como dados para outros estudos. Oliveira (2003), Tavares & Castro (2005) e Fiúza (2008) buscaram determinar zonas inundáveis em margens de rios. Para tanto foi necessário primeiro a obtenção do hidrograma da seção de interesse, cujo cálculo foi feito através do HEC-HMS, para depois simular as áreas de inundação.

Estudos envolvendo o HEC-HMS como modelo principal não são tão freqüentes, porém pode-se citar Milde *et al.* (2002) e Hammouri & El-Naqa (2007). Para os primeiros autores o intuito era apenas testar a geração de hidrogramas para uma bacia hidrográfica, cujos resultados se apresentaram mais realistas para eventos de menor duração, como uma chuva intensa de curta duração. Verificaram ainda, a necessidade de um critério que permitisse padronizar as conclusões com base nos valores encontrados para a função objetivo (função de calibração do HEC-HMS). Já Hammouri & El-Naqa (2007) aplicaram o modelo para a construção de hidrogramas em bacias que não possuem dados de vazão.

Independentemente da ordem final em que o modelo é usado, nota-se que o HEC-HMS é amplamente utilizado em modelagem hidrológica. Segundo Tavares & Castro (2005), a engenharia hidrológica vem se beneficiando consideravelmente com o desenvolvimento de programas que implementam algoritmos para a quantificação de processos hidrológicos, como é o caso do HEC-HMS.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Área de estudo

A bacia hidrográfica do rio Negrinho localiza-se sobre os municípios de Rio Negrinho e São Bento do Sul, ao Norte do Estado de Santa Catarina (Figura 6).

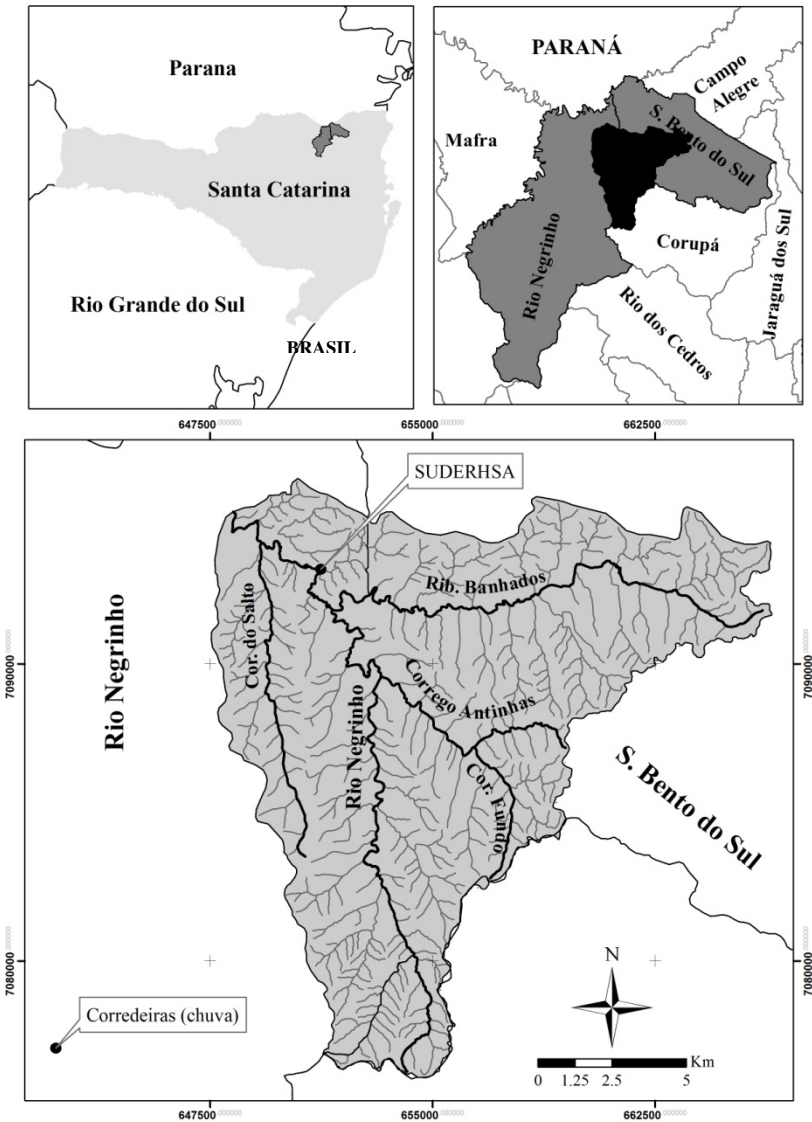


Figura 6. Localização da bacia hidrográfica do rio Negrinho.

Esta bacia possui uma área de 195,08 km² e situa-se entre as longitudes 49°20'01"W e 49°30'14"W e, latitudes 26°14'37"S e

26°25'40''S. Segundo EMBRAPA (1998), a bacia apresenta 9 tipos principais de solo e suas particularidades encontram-se descritas na Tabela 5. Geologicamente é constituída de depósitos flúvio-deltáicos, compreendendo arenitos argilosos, siltitos, argilitos, folhelhos carbonosos, leitos de carvão e conglomerados.

A vegetação predominante na bacia é a Floresta de Araucária, denominada de Floresta Ombrófila Mista (KLEIN, 1978). Tal vegetação é parte constituinte do bioma Mata Atlântica, cuja cobertura original foi na sua maior parte descaracterizada pela exploração das florestas para extração de madeiras, bem como pela implantação de cultivos anuais e pelas pastagens, para a criação extensiva de gado bovino (SANTA CATARINA, 1986). Atualmente, a cobertura vegetal predominante é de floresta secundária em estágio avançado de regeneração, com a presença de cultivos anuais, pastagens e florestas plantadas de pinus (*Pinus taeda*).

A temperatura média anual na região é de 18,3 °C, com a temperatura do mês mais quente sempre inferior a 22°C. A precipitação média anual é de 1.572 mm/ano (KOBAYAMA *et al.*, 2004). A região encontra-se sob influência do clima Cfb (classificação de Köppen) - Mesotérmico, subtropical úmido, com verões frescos, sem estação seca e com geadas severas frequentes. A evapotranspiração potencial anual estimada pelo método de Thornthwaite é de 54,6% da precipitação total (KOBAYAMA *et al.*, 2004).

Tabela 5. Tipos de solos na bacia hidrográfica do Rio Negrinho – SC.

Tipo de Solo	Descrição
Ca04	Cambissolo Álico Tb A moderado, textura argilosa casca-lhenta, fase floresta tropical perenifólia, relevo forte ondulado.
Ca09	Cambissolo Álico Tb A moderado, textura argilosa, fase floresta subtropical perenifólia, relevo suave ondulado e ondulado
Ca23	Associação Cambissolo Álico Tb A moderado, textura argilosa + Podzólico Bruno-Acinzentado Álico A moderado, textura média/argilosa, ambos fase floresta subtropical perenifólia, relevo ondulado e forte ondulado.
Ca32	Associação Cambissolo Álico Tb A moderado, textura argilosa, relevo montanhoso + Solos Litólicos Distróficos A moderado, textura argilosa, relevo montanhoso e escarpado (substrato migmatito), ambos fase floresta tropical perenifólia.
Ca37	Cambissolo Álico Tb A moderado e proeminente, textura média, fase floresta e campo subtropical, relevo ondulado e forte ondulado.
Ca38	Associação Cambissolo Álico Tb A moderado, textura média, relevo forte ondulado + Cambissolo Álico Tb A moderado, textura argilosa, relevo ondulado + Podzólico Vermelho-Amarelo Álico Tb A moderado, textura argilosa, relevo ondulado, todos fase floresta tropical/subtropical perenifólia.
Ca47	Cambissolo Álico Tb A proeminente, textura argilosa, fase floresta subtropical perenifólia, relevo forte ondulado.
Ca51	Associação Cambissolo Álico Tb A proeminente, textura argilosa, relevo ondulado + Solos Litólicos Álicos A proeminente, textura média, relevo forte ondulado (substrato sedimentos pelíticos), ambos fase floresta subtropical perenifólia.
HGPa6	Associação Glei Pouco Húmico Álico Tb, textura média, relevo plano + Cambissolo Álico Tb gleico A húmico, textura argilosa, relevo praticamente plano, ambos fase floresta subtropical perenifólia de várzea.

Fonte: EMBRAPA, 1998.

4.2. O Programa HEC-HMS

4.2.1. Simulação Hidrológica

A maior parte da literatura pesquisada que envolve o emprego do HEC-HMS em seus estudos relata a utilização de MDE ou MDT (modelo digital de elevação e modelo digital de terreno, respectivamente) e Sistemas de Informação Geográfica (SIG) como procedimento anterior ao mesmo. Isto ocorre, pois o HEC-HMS requer a entrada de certos parâmetros que podem ser obtidos por meio de programas SIGs. Exemplos destes parâmetros são apontados a seguir, no entanto, a necessidade por um ou outro parâmetro é determinada em função da escolha dos métodos de cálculo disponíveis no HEC-HMS (perdas, transformação, fluxo base, propagação, armazenamento (Figura 7).

Exemplos de parâmetros requeridos pelo programa são: área da bacia; *Curve Number* (CN); percentual impermeável da bacia; tempo de resposta (*lag time*), que por sua vez requer o comprimento do rio principal (L), e o comprimento do rio principal desde o ponto mais próximo do centróide da bacia até o exultório (L_{cg}); *Coefficient Peak* (C_p), que por sua vez requer a declividade da bacia (S), que requer a diferença de cota entre as curvas de nível (Δ), e o comprimento total das curvas de nível na bacia (L_c).

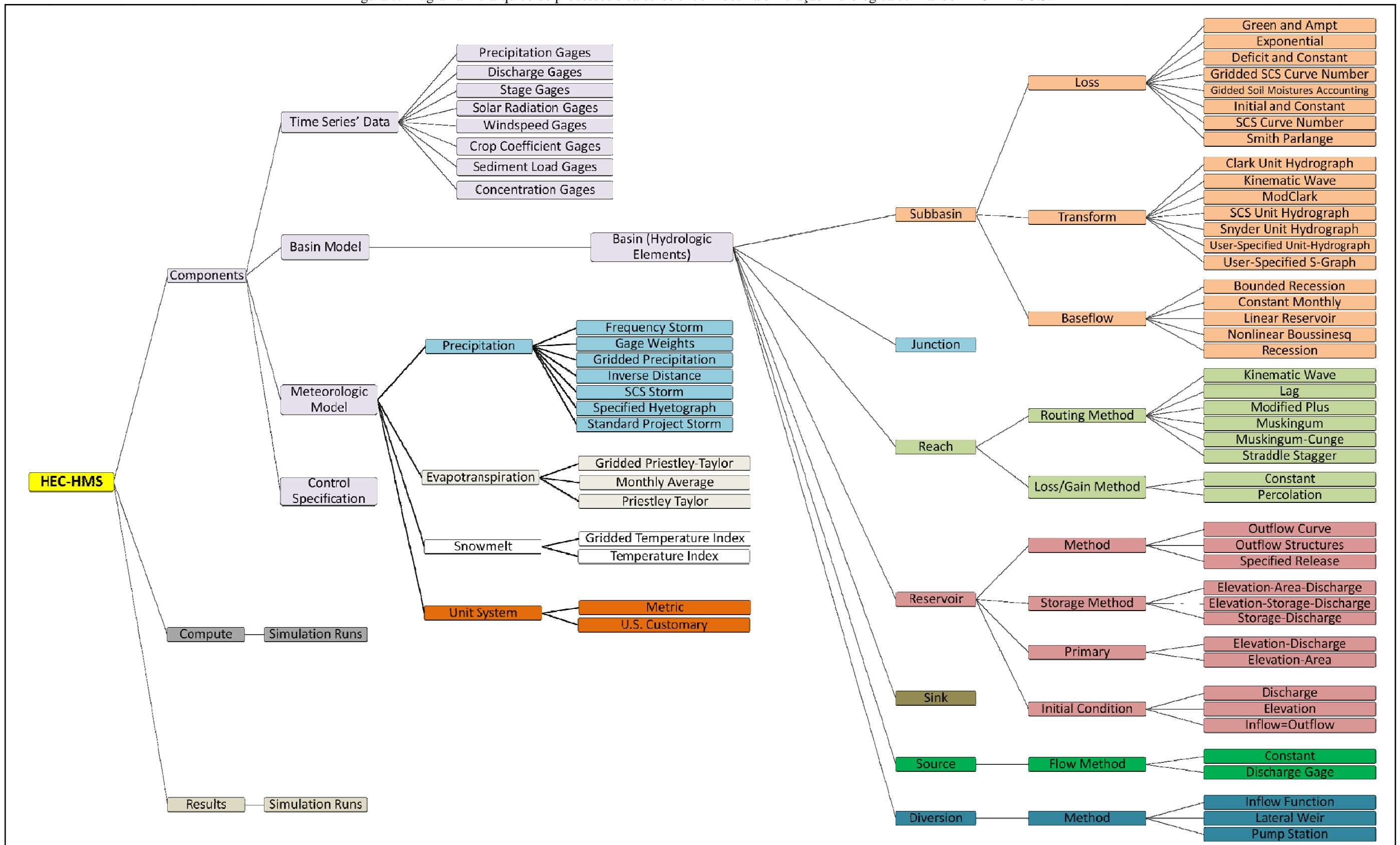
Embora os programas SIGs facilitem a obtenção destes parâmetros, sua utilização não é compulsória. Para obter os referidos dados de entrada foi empregado apenas o software AutoCad Map. Com este programa é possível extrair estas informações apenas com um mapa digitalizado da bacia. A vantagem dos programas SIGs é que com eles é possível determinar com maior facilidade e precisão informações geográficas distribuídas quanto à caracterização geológica e, quanto ao tipo de uso e ocupação do solo – dados úteis na determinação das perdas por infiltração. Segundo Tavares e Castro (2005), os bancos de informações gerados no SIG tornam automáticas tarefas exaustivas de entrada de dados em programas computacionais de estudos hidrológicos e, por isto, são altamente recomendados.

Para melhor compreensão do funcionamento do HEC-HMS a Figura 7 apresenta um diagrama hierárquico com toda a estrutura e todas as opções de cálculo disponíveis no programa. Como se pode observar, a seção *Components* contem 4 módulos, cujas partes precisam ser desenvolvidas para elaboração do modelo. É nesta seção em que o usuário necessita de conhecimentos em hidrologia para ponderar sobre quais

opções escolher. As outras duas seções nada mais fazem do que iniciar a simulação (*Compute*) e apresentar os resultados da mesma (*Results*).

No item a seguir será descrita a rotina desenvolvida para a elaboração do modelo hidrológico da bacia e para obtenção dos parâmetros envolvidos com a relação chuva-vazão da bacia.

Figura 7. Diagrama hierárquico de processos e cálculos envolvidos na simulação hidrológica utilizando HEC-HMS 3.3.



4.2.2. Procedimento

A metodologia empregada neste trabalho para determinar a relação chuva-vazão consistiu em três etapas: simular hidrogramas sintéticos, compará-los com os respectivos hidrogramas observados e, ajustar os parâmetros de simulação.

A simulação de hidrogramas sintéticos é a etapa que envolveu o maior número de tarefas. Primeiro, buscou-se a aquisição de dados pluviométricos da bacia do Rio Negrinho na página eletrônica da Agência Nacional de Águas (ANA) <<http://hidroweb.ana.gov.br>>. No entanto, estes dados estão disponíveis apenas para a estação do Rio Corredeiras (Figura 6), bacia adjacente monitorada pela SUDERHSA. A distância entre as estações pluviométricas das duas bacias é de aproximadamente 15 km, porém, a inexistência de dados para Rio Negrinho forçou a utilização dos dados da bacia do Rio Corredeiras. Os dados diários de chuva estão disponíveis para o período desde janeiro de 1977 até dezembro de 2008, que foram organizados por ano e selecionados 4 precipitações máximas anuais (2005, 2006, 2007 e 2008).

Após obter o mapa digitalizado da bacia do Rio Negrinho¹ e subdividi-la em 7 sub-bacias, procedeu-se a elaboração dos modelos hidrológicos de cada ano utilizando o HEC-HMS. Como se pode observar pela Figura 7, um modelo hidrológico no HEC-HMS abrange 4 componentes: *time series data*, *basin model*, *meteorologic model* e, *control specification*. Dentre estes, o componente mais importante é *basin model*, pois é através dele que se define a representação física da bacia. A Figura 8 ilustra os elementos hidrológicos inseridos no modelo para desempenhar tal representação: 7 sub-bacias e 4 junções.

Dentro do elemento *subbasin*, é necessário definir 3 módulos (perdas, transformação e fluxo base), cada um contendo diversos métodos de cálculo. As opções escolhidas para cada um foram respectivamente: SCS *Curve Number* (SCS-CN), Hidrograma Unitário de Snyder e, método da Recessão. O motivo para escolha destes métodos se deve ao fato de envolverem conceitos amplamente encontrados na literatura.

O método do SCS-CN é um método do *National Resource Conservation Service*, do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA) para determinação da chuva excedente, ou seja, da parcela da chuva que efetivamente escoará superficialmente pela bacia. Este método estabeleceu uma relação empírica entre a capacidade de armazena-

¹ Fornecido pelo Laboratório de Hidrologia da Universidade Federal de Santa Catarina.

mento da bacia e um índice denominado *curve number* (CN). A relação é definida da seguinte maneira (CANHOLI, 2005):

$$S_D = \frac{25.400 - 254 \cdot CN}{CN} \quad (1)$$

onde, S_D é o armazenamento máximo (mm); e CN é o índice ≤ 100 . Destaca-se que quando CN é igual a 100, o armazenamento é nulo.

Para estimativa do valor de CN , devem-se observar os valores tabelados disponíveis em função do tipo de solo e do uso e ocupações existentes na área de interesse. A determinação da chuva excedente é calculada a partir da fórmula:

$$R = \frac{(P - I_a)^2}{(P + I_a) + S_D} \quad (2)$$

onde, R é a precipitação excedente (deflúvio) em mm; P é a precipitação (mm) e; I_a é a abstração inicial (mm), sendo: $I_a = 0,2 \cdot S_D$.

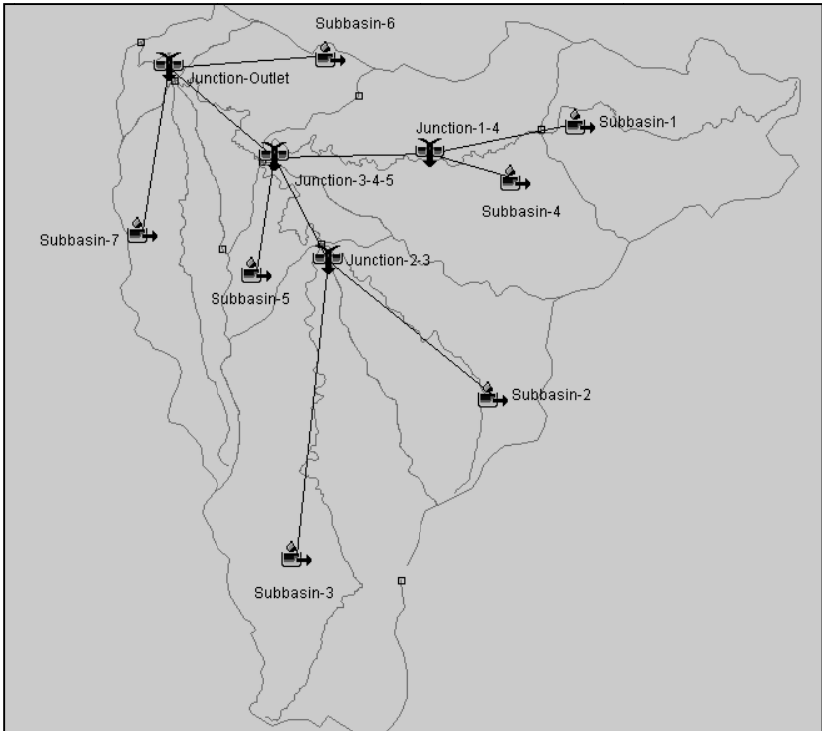


Figura 8. Elementos hidrológicos que compõe a representação da bacia.

O HU de Snyder é um método para obtenção do HU sintético. Este método estabelece um conjunto de equações relacionando características físicas da bacia hidrográfica com as propriedades do HU resultante (FENDRICH, 2008). Adotando como parâmetro básico o tempo de resposta da bacia (t_p) – definido como o intervalo de tempo compreendido entre o centro de gravidade do hietograma da precipitação efetiva e o pico do hidrograma – Snyder propôs a seguinte expressão para o cálculo de t_p e da vazão de pico (Q_p):

$$t_p = 0,75 \cdot C_t (L \cdot L_c)^{0,3} \quad (3)$$

$$Q_p = \frac{2,76 \cdot C_p \cdot A}{t_p} \quad (4)$$

onde t_p é o tempo de resposta (horas); C_t é um coeficiente numérico, variando entre 1,8 e 2,2 para as áreas estudadas por Snyder, e entre 0,3 e 1,0 para áreas urbanas (RAMOS, 1972); L é o comprimento do rio principal (km); L_c é o comprimento ao longo do rio principal do ponto mais próximo do centróide da bacia até a exultória (km); e A é a área da bacia hidrográfica (km²).

Os coeficientes C_t e C_p a serem aplicados nas equações (3) e (4) dependem do grau de impermeabilização e da declividade do curso principal da bacia (FENDRICH, 2008). No entanto, segundo USACE-HEC (2000), estes parâmetros (C_t e C_p) são melhores definidos através da calibração do modelo.

O método de recessão para o fluxo base define a relação da vazão de base em qualquer tempo (Q_t), com um valor de vazão de base inicial (Q_0) e uma constante exponencial de decaimento (k); expresso matematicamente como (USACE-HEC, 2000):

$$Q_t = Q_0 \cdot k^t \quad (5)$$

Ou seja, a contribuição de base decai exponencialmente a partir do fluxo inicial.

Concluída a fase de simulação dos hidrogramas sintéticos foi necessário compará-los com os hidrogramas reais ocorridos durante os eventos de chuva (hidrogramas observados). A obtenção dos hidrogramas observados procedeu-se através da transformação do nível da água do rio em vazão por meio da curva-chave (Figura 9). Os dados de cotas de nível foram obtidos na página eletrônica da ANA e, a curva-chave foi fornecida pela SUDERHSA. O procedimento consistiu em extrair desta série de dados, os valores de nível observados nas mesmas datas em que foram monitoradas as alturas pluviométricas e, em seguida, verificar um a um, o valor da vazão correspondente. A Tabela 6 apresenta os dados brutos utilizados neste trabalho.

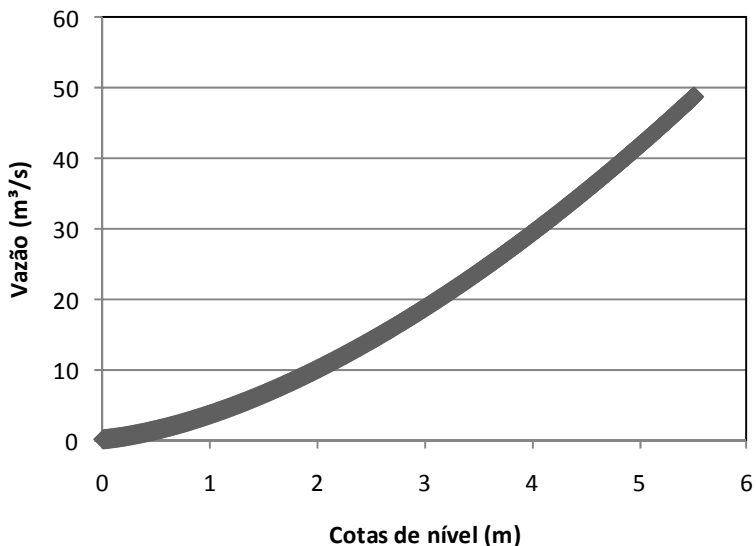


Figura 9. Curva-chave da Bacia Hidrográfica do Rio Negrinho-SC.

Tabela 6. Dados diários utilizados de chuva, cota e, vazão.

1º Evento			2º Evento			3º Evento			4º Evento		
25/10/05 a 10/11/05			27/09/06 a 11/10/06			14/09/07 a 30/09/07			25/04/08 a 16/05/08		
Chuva	Cota	Vazão	Chuva	Cota	Vazão	Chuva	Cota	Vazão	Chuva	Cota	Vazão
mm	m	m³/s	mm	m	m³/s	mm	m	m³/s	mm	m	m³/s
0	114	4,53	0	37	1,11	0	26	0,78	0	45	1,38
0	113	4,47	0	30	0,9	0	26	0,78	0	42	1,28
0	109	4,26	0	24,5	0,73	0	26	0,78	3,2	40	1,21
36,3	108	4,2	0	34	1,02	0,5	26	0,78	0	40	1,21
53,1	373,5	26,6	33	100	3,78	5,4	28	0,84	77,1	216	11,48
0	489	40,58	19,2	228	12,37	0,8	28	0,84	7,8	197	10
9,5	308	19,72	2,2	100	3,78	0	33	0,99	0	104	3,99
0	289	17,87	0	75	2,57	40,6	195	9,85	29,7	97	3,63
0	276	16,66	0	57,5	1,84	52,9	333	22,24	0	128	5,33
6,2	259,5	15,17	0	51,5	1,62	1,5	215	11,4	0	115	4,58
0	249	14,23	0	48	1,49	2,5	97	3,63	0	100	3,78
3	243,5	13,75	0	42	1,28	0	70	2,35	0	90	3,28
0	233	12,87	0	39,5	1,19	0,3	63	2,06	0	79	2,75

1° Evento			2° Evento			3° Evento			4° Evento		
25/10/05 a 10/11/05			27/09/06 a 11/10/06			14/09/07 a 30/09/07			25/04/08 a 16/05/08		
Chuva mm	Cota m	Vazão m³/s	Chuva mm	Cota m	Vazão m³/s	Chuva mm	Cota m	Vazão m³/s	Chuva mm	Cota m	Vazão m³/s
0	226	12,29	0	32,5	0,97	0,3	60	1,94	0	73	2,49
5,1	216,5	11,51	0	30	0,9	0,6	57	1,82	0	64	2,1
0	181	8,82				0	52	1,63	0	62	2,02
0	105	4,04				0	48	1,49	0	60	1,94
									0,7	58	1,86
									0	55	1,75
									0	52	1,63
									0	50	1,56
									0	48	1,49

Uma vez finalizadas as simulações e comparações, a terceira fase da metodologia envolveu a calibração dos hidrogramas para obter os parâmetros de melhor ajuste entre as curvas simuladas e observadas. A calibração procedeu-se tanto pela “função objetivo” do HEC-HMS – *Peak Weighted RMS Error* – como pela observação do melhor encaixe entre as curvas. Os resultados obtidos são apresentados a seguir.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Hidrogramas Sintéticos

O estudo hidrológico da bacia do Rio Negrinho abrangeu a análise de hidrogramas de vazões máximas anuais a partir da comparação entre quatro hidrogramas observados e simulados. As Figura 10, Figura 11, Figura 12 e Figura 13 mostram os hidrogramas resultantes dos eventos chuvosos estudados.

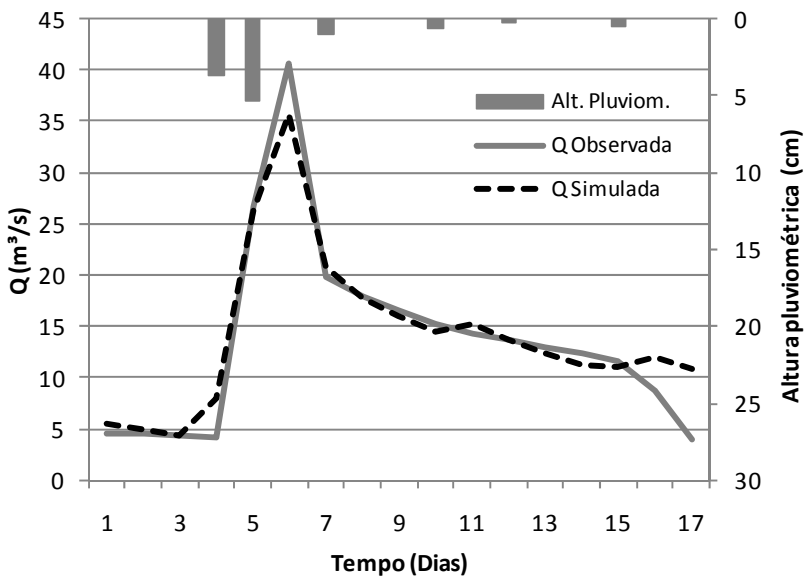


Figura 10. Hidrograma de cheia entre os dias 25/10/05 e 10/11/05.

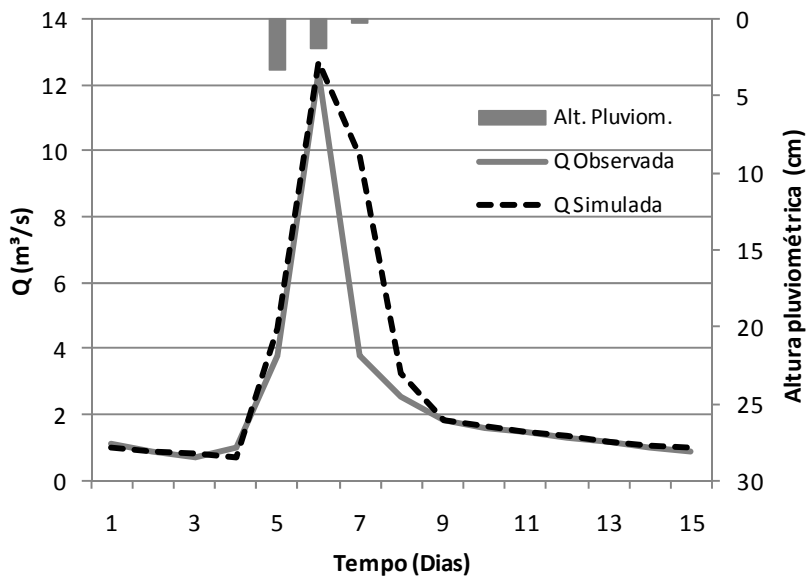


Figura 11. Hidrograma de cheia entre os dias 27/09/06 e 11/10/06.

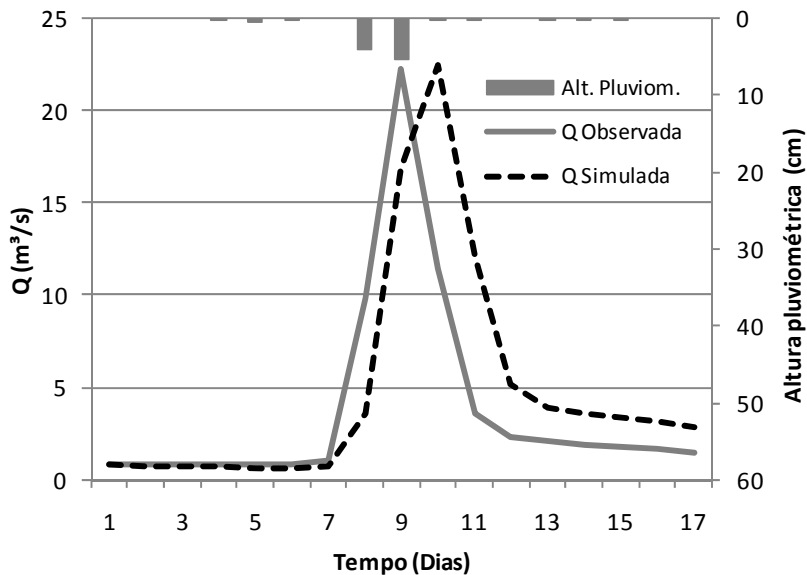


Figura 12. Hidrograma de cheia entre os dias 14/09/07 e 30/09/07.

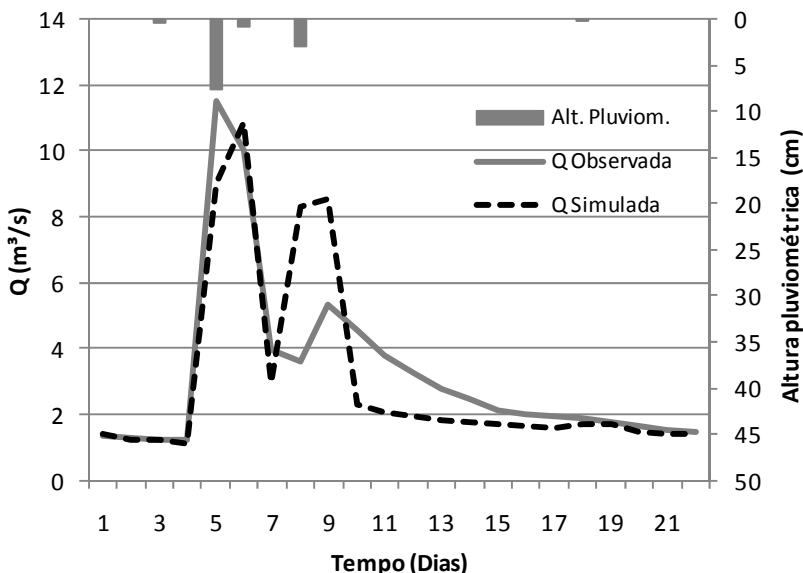


Figura 13. Hidrograma resultante da chuva ocorrida entre 25/4/08 e 16/5/08.

O hidrograma da Figura 10 é o resultado de seis dias de precipitação não consecutivos de um total de 17 dias de observação, somando uma altura pluviométrica de 113,2 mm. O dia de maior precipitação (53,1 mm) ocorreu um dia antes do pico do hidrograma, cujos valores observado e simulado foram, respectivamente, 40,58 e 35,62 m^3/s . Nota-se um ajuste consideravelmente bom entre os dois hidrogramas, sendo a diferença entre as vazões de pico de apenas 14%.

O hidrograma da Figura 11, compreendido entre os dias 27/09 e 11/10 de 2006, é resultado de apenas 3 dias consecutivos de chuva, totalizando 54,4 mm. No dia de maior intensidade foram precipitados 33 mm, sendo que o pico do hidrograma ocorreu no dia seguinte. O valor da vazão máxima atingiu 12,37 m^3/s e a vazão de pico simulada 12,68 m^3/s , indicando uma diferença de apenas 2,5%. Além disto, tanto o fluxo base inicial como final se ajustaram muito bem ao hidrograma observado.

O hidrograma da Figura 12 resulta de um evento de 9 dias de chuva de um total de 17 dias de observação, compreendidos entre 14/09 e 30/09 de 2007. As precipitações totalizaram 105,4 mm, sendo o dia de maior intensidade (52,9 mm) coincidente com a vazão de pico do hidrograma observado. A vazão máxima do hidrograma simulado (22,49

m^3/s), no entanto, ficou deslocada em 1 dia em relação ao hidrograma observado ($22,24 \text{ m}^3/\text{s}$). Mesmo assim, os valores máximos encontrados diferem apenas em 1,1%, e o fluxo base inicial também apresentou um excelente ajuste.

O hidrograma da Figura 13 foi o que apresentou o pior ajuste entre os eventos estudados. É preciso considerar, no entanto, que este foi o único em que ocorreram dois picos de vazão. Provavelmente o HEC-HMS não foi capaz de computar corretamente as perdas pluviométricas para o segundo pico e, por isto, o superestimou em relação ao hidrograma observado. Tal afirmação torna-se ainda mais evidente quando se observa que para o primeiro pico o ajuste entre as curvas foi extremamente compatível. Durante o período de 22 dias compreendidos entre 25/04 e 16/05 de 2008 ocorreram 5 dias de chuva totalizando 118,5 mm, sendo 77,1 mm no dia de maior intensidade. Este dia também coincidiu com o pico mais alto do hidrograma observado ($11,48 \text{ m}^3/\text{s}$), em contraste à curva simulada ($10,83 \text{ m}^3/\text{s}$), que ocorreu no dia seguinte. A discrepância entre as duas curvas foi ainda maior para o segundo pico: $5,33 \text{ m}^3/\text{s}$ e $8,57 \text{ m}^3/\text{s}$ para as vazões observada e simulada respectivamente.

5.2. Parâmetros de Simulação

Para computar os hidrogramas sintéticos apresentados nas figuras acima foi necessário ajustar 8 parâmetros de simulação, cujos valores obtidos encontram-se descritos na Tabela 7 e Tabela 8.

Como se pode observar foram obtidos, de fato, valores parecidos tanto para o tempo de resposta (coeficiente de variação, $\sigma/\bar{x} = 0,30$), como também para o CN (coeficiente de variação, $\sigma/\bar{x} = 0,28$ –Tabela 8). Os valores da Tabela 7 são os números que melhor originaram o hidrograma simulado, sendo este o mais compatível possível com o hidrograma observado.

Para os parâmetros diretamente relacionados com as características físicas da bacia hidrográfica, como os mencionados no parágrafo anterior, já eram esperados que fossem encontrados valores semelhantes entre os diferentes eventos estudados. Os elementos que compõe a equação (3) provem de características físicas da bacia que não se modificam e, conseqüentemente, t_p também não haveria de mudar. Com exceção do evento de 2005, cujo valor para t_p foi de 30 horas, todos os outros eventos apresentaram resultados entre 16 e 18 horas.

Outro ponto de importante observação, porém antagônico ao do parágrafo acima e que envolve a própria equação do tempo de resposta da bacia, refere-se ao fato de que cada uma das sub-bacias deveria apre-

sentar diferentes tempos de resposta, uma vez que tanto o comprimento do rio principal como a localização do centróide varia de uma para outra – sub-bacias menores apresentariam tempos de resposta menores. No entanto, isto não foi observado. Exceto pelo evento de 2008, em que cada sub-bacia apresentou diferentes tempos de resposta, o melhor ajuste para simulação do hidrograma sempre ocorreu quando atribuído o mesmo t_p para todas as sub-bacias. Além disto, os tempos de resposta de cada sub-bacia obtidos através da equação (3) são diferentes dos valores ajustados pelo programa. Resultados semelhantes também foram obtidos por Milde *et al.* (2002) que relatam que o tempo de resposta calculado pela equação e inicialmente inserido no HEC-HMS foi modificado quando realizados os ajustes de calibração.

Direcionando o foco para outro parâmetro fisiográfico, verifica-se pela Tabela 8 que o *CN* também apresentou valores semelhantes entre os diferentes eventos de chuva ($\sigma/\bar{x} = 0,28$). Exceto pelo evento de 2008, cujo valor médio de *CN* da bacia foi $39,04 \pm 6,79$, os outros três eventos apresentaram valores em torno de 76, sendo 83,00 (2007), $74,53 \pm 1,35$ (2006), e $70,34 \pm 16,36$ (2005).

O método de perdas do SCS *Curve Number* utiliza coeficientes de classificação hidrológica e cobertura dos solos para se relacionar à capacidade de armazenamento da bacia. Este coeficiente varia de 0 a 100 e quanto maior o for, menor será o armazenamento (infiltração). É compreensível que o *CN* da bacia dos diferentes eventos apresente valores próximos, porém não tão semelhantes entre si, pois a cobertura de uso e ocupação do solo varia sazonalmente, sobretudo numa bacia predominantemente rural. Em função da grande área agrícola da bacia, a forma de cultivo, o tipo de cultura, e a época de colheita alteram significativamente o *CN*. Além disto, existem diversas empresas de reflorestamento de pinus e eucalipto na região, que parcelam o solo e apresentam diferentes épocas de corte para madeira, modificando também a capacidade de infiltração do solo.

Se o *CN* define o armazenamento de água no solo, valores altos deveriam corresponder à pequenas abstrações iniciais (I_a). Como se pode observar pela Tabela 7, não foi verificado qualquer relação neste sentido e, portanto, a fórmula $I_a = 0,2 \cdot S_D$ da equação (2) não se confirmou. Os valores de abstração inicial calculados por esta equação e inicialmente inseridos no HEC-HMS também foram redefinidos pelo programa no momento da calibração entre as curvas. A Tabela 7 apresenta apenas os valores de I_a que melhor se ajustaram para obtenção do hidrograma simulado.

Uma possível explicação para estes resultados envolve a distribuição espacial da chuva sobre a bacia. Como os únicos dados pluviométricos disponíveis para a bacia do Rio Negrinho – e que foram utilizados neste trabalho – provém de um pluviômetro localizado fora da área da bacia, os mesmos podem não corresponder verdadeiramente à precipitação que ocorre dentro da bacia. Além disto, mesmo que o pluviômetro estivesse localizado dentro da bacia isto não significa que a chuva cairia uniformemente sobre todas as partes da mesma e, tão pouco, com a mesma intensidade. Assumir tais considerações é admitir que somente o solo tenha influência sobre a infiltração, o que não é verdade, a distribuição espacial também é um fator importante. O fato de tais hipóteses terem sido adotadas pode ocultar as verdadeiras abstrações iniciais e, portanto, elas não estariam relacionadas ao *CN*.

No que concerne ao fluxo base inicial, este foi o único parâmetro que não exigiu ajustes. Os valores de vazão para cada sub-bacia nos diferentes eventos foram obtidos a partir dos fluxos base observados antes do início da chuva ponderado em função da área relativa da sub-bacia. Este procedimento resultou em hidrogramas simulados com o fluxo base sempre compatíveis com o fluxo base dos hidrogramas observados; como pode ser verificado nas Figura 10 a Figura 13.

Alusivamente aos demais parâmetros envolvidos na simulação – constante de recessão, razão de pico e coeficiente de pico, estes são elementos matemáticos que apenas definem a forma da curva do hidrograma e não apresentam qualquer relação direta com as características físicas da bacia. Portanto, sua determinação é feita exclusivamente a partir da calibração. Estas condicionantes sugerem que não seria possível obter valores únicos de parâmetros que fossem capazes de determinar a relação adequada de chuva-vazão, pois a bacia pode responder de forma diferente em função das condições iniciais: umidade e uso e ocupação do solo, que variam bastante numa bacia rural.

Tabela 7. Valores ajustados dos parâmetros envolvidos na simulação.

Ano	Fluxo Base (Recessão)			Transformação (Snyder)		Perdas (SCS-CN)		
	Fluxo Inicial (m ³ /s)	<i>k</i>	Razão de pico	Tempo Resposta (horas)	<i>C_p</i>	Abstração Inicial (mm)	<i>CN</i>	Imperm (%)
2008								
SB-1	0,19	0,76	0,15	13,94	0,74	14,38	35,33	5
SB-2	0,20	1,00	0,15	14,40	1,00	15,29	35,05	5
SB-3	0,38	1,00	0,15	30,84	0,10	28,77	46,31	5
SB-4	0,29	0,82	0,16	19,22	1,00	23,47	35,08	5
SB-5	0,07	0,76	0,15	14,66	0,75	3,20	35,20	5
SB-6	0,10	0,77	0,15	17,74	0,10	25,50	51,21	5
SB-7	0,16	0,83	0,16	19,22	1,00	14,95	35,10	5
2007	Fluxo Base (Recessão)			Transformação		Perdas (SCS-CN)		
SB-1	0,11	0,90	0,10	16,00	1,00	1,45	83,00	5
SB-2	0,11	0,90	0,10	16,00	1,00	1,48	83,00	5
SB-3	0,21	0,90	0,10	16,00	1,00	2,86	83,00	5
SB-4	0,16	0,90	0,10	16,00	1,00	2,16	83,00	5
SB-5	0,04	0,90	0,10	16,00	1,00	0,49	83,00	5
SB-6	0,06	0,90	0,10	16,00	1,00	0,78	83,00	5
SB-7	0,09	0,90	0,10	16,00	1,00	1,18	83,00	5
2006	Fluxo Base (Recessão)			Transformação		Perdas (SCS-CN)		
SB-1	0,15	0,90	0,26	18,00	1,00	4,93	75,57	5
SB-2	0,16	0,90	0,26	18,00	1,00	24,96	73,79	5
SB-3	0,30	0,90	0,26	18,00	1,00	23,37	73,79	5
SB-4	0,23	0,90	0,26	18,00	1,00	23,37	73,79	5
SB-5	0,05	0,90	0,26	18,00	1,00	4,85	77,21	5
SB-6	0,08	0,90	0,26	18,00	1,00	21,58	73,79	5
SB-7	0,13	0,90	0,26	18,00	1,00	25,37	73,79	5
2005	Fluxo Base (Recessão)			Transformação		Perdas (SCS-CN)		
SB-1	0,76	0,90	0,55	30,00	1,00	2,93	94,08	5
SB-2	0,78	0,90	0,55	30,00	1,00	22,96	61,34	5
SB-3	1,50	0,90	0,55	30,00	1,00	21,37	62,28	5
SB-4	1,13	0,90	0,55	30,00	1,00	21,37	62,29	5
SB-5	0,26	0,90	0,55	30,00	1,00	2,85	94,27	5
SB-6	0,41	0,90	0,55	30,00	1,00	19,58	57,48	5
SB-7	0,62	0,90	0,55	30,00	1,00	23,37	60,67	5

Tabela 8. Média e desvio padrão dos parâmetros envolvidos na simulação.

Média	Fluxo Base (Recessão)			Transformação (Snyder)		Perdas (SCS-CN)		
	Fluxo Inicial (m ³ /s)	<i>k</i>	Razão de pico	Tempo Resposta (horas)	<i>C_p</i>	Abstração Inicial (mm)	<i>CN</i>	Imperm (%)
SB-1	0,30 ±0,31	0,87 ±0,07	0,27 ±0,02	19,49 ±7,20	0,94 ±0,13	5,92 ±5,82	72,00 ±25,60	5,00 ±0,00
SB-2	0,31 ±0,31	0,93 ±0,05	0,27 ±0,02	19,60 ±7,09	1,00 ±0,00	16,17 ±10,64	63,29 ±20,82	5,00 ±0,00
SB-3	0,60 ±0,60	0,93 ±0,05	0,27 ±0,02	23,71 ±7,80	0,78 ±0,45	19,09 ±11,27	66,35 ±15,82	5,00 ±0,00
SB-4	0,45 ±0,45	0,88 ±0,04	0,27 ±0,02	20,81 ±6,27	1,00 ±0,00	17,59 ±10,33	63,54 ±20,78	5,00 ±0,00
SB-5	0,10 ±0,10	0,87 ±0,07	0,27 ±0,02	19,67 ±7,02	0,94 ±0,13	2,85 ±1,80	72,42 ±25,80	5,00 ±0,00
SB-6	0,16 ±0,16	0,87 ±0,07	0,27 ±0,02	20,43 ±6,44	0,78 ±0,45	16,86 ±11,00	66,37 ±14,61	5,00 ±0,00
SB-7	0,25 ±0,25	0,88 ±0,04	0,27 ±0,02	20,80 ±6,27	1,00 ±0,00	16,22 ±11,00	63,14 ±20,82	5,00 ±0,00
\bar{x}	0,31	0,89	0,27	20,64	0,92	13,53	66,73	5,00
σ/\bar{x}	1,12	0,06	0,00	0,30	0,26	0,76	0,28	0,00

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho abordou o estudo hidrológico da bacia do Rio Negro através de simulação matemática utilizando o HEC-HMS. Nota-se, a partir dos resultados, que o HEC-HMS foi capaz de construir hidrogramas sintéticos muito bem ajustados aos hidrogramas observados quando empregados os métodos do SCS-CN para o cálculo de perdas, de Snyder para transformação chuva-vazão, e de recessão para o escoamento de base. Tanto a vazão de pico como o volume do escoamento obtiveram resultados satisfatórios, sendo a menor diferença da vazão máxima entre o hidrograma simulado e observado de apenas 1,1%. Por outro lado, foi observado que a configuração deste modelo pode não calcular corretamente eventos com mais de um pico de vazão. Coincidentemente, Milde *et al.* (2002) descreve que obteve hidrogramas sintéticos melhores quando simulados eventos de menor duração com um único pico no hidrograma.

Quanto aos parâmetros de simulação, destaca-se que exceto pelo fluxo base inicial, todos os outros parâmetros inicialmente inseridos no HEC-HMS foram ajustados pelo modelo no momento da calibração. Mesmo parâmetros fisiográficos da bacia, que teoricamente deveriam se manter inalterados durante a calibração e, constantes entre os diferentes eventos estudados, como tp , apresentaram modificações. O tempo de resposta inicialmente calculado em torno de 2,2 horas foi ajustado para 20,64 horas em média e, o coeficiente de variação para tp foi de 0,30. O CN , outro parâmetro físico da bacia, porém passível de variações em virtude de alterações periódicas do uso do solo (bacia rural), apresentou valor médio para a bacia como um todo de 66,73 e coeficiente de variação de 0,28.

Apesar dos bons resultados obtidos pela simulação, não é possível afirmar que foi determinada a relação chuva-vazão da bacia, ou seja, a validação dos parâmetros, pois os valores médios dos parâmetros de cada sub-bacia são representativos de apenas quatro simulações. Sendo de interesse validar a configuração deste modelo, seriam necessárias mais simulações.

Milde *et al.*(2002), que utiliza o HEC-HMS para simular hidrogramas sintéticos de 28 eventos de chuva (testando três métodos de transformação chuva-vazão: Snyder, SCS e Clark) também não propõe valores validados. No referido estudo, assim como neste presente trabalho, relata-se apenas que as simulação apresentaram resultados satisfatórios e que o HEC-HMS é uma boa ferramenta na construção de hidro-

gramas sintéticos e na previsão de cenários futuros, pois a alteração dos parâmetros permite rápida visualização dos resultados.

Sugere-se para trabalhos futuros que sejam testados outros métodos de transformação e que sejam realizados um número maior de simulações. Seria interessante também, aplicar os parâmetros ajustados para obtenção de hidrogramas de projeto provenientes de chuvas intensas relacionadas a um determinado período de recorrência, para verificar a eficácia do programa em projetos de drenagem.

Outra recomendação é verificar o ajuste dos hidrogramas sem considerar a divisão da área de drenagem em sub-bacias, uma vez que isto simplificaria bastante o modelo, considerando-se que existe apenas uma estação pluviométrica e que os dados de chuva são extrapolados para toda bacia. Se mesmo assim não fosse possível determinar a relação chuva-vazão, a idéia seria agrupar eventos de chuva de mesma intensidade e tentar determinar a relação em função de cada intensidade; assumindo que para condições iniciais constantes e intensidades de precipitação semelhante, a bacia apresentaria hidrogramas parecidos e, conseqüentemente parâmetros ideais para uma relação chuva-vazão consistente.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BENAVIDES J.A.; PIETRUSZEWSKI B.; KIRSCH B.; BEDIENT P. Analyzing Flood Control Alternatives for the Clear Creek Watershed in a Geographic Information Systems Framework. In: ASCE Conf. Proc. 111, 39, 2001.
- CALÇADA, M.; PORTELA, M; MATOS, J. Análise de Cheias e Delimitação de Zonas Inundáveis em Timor-Leste: Abordagem por Modelação Geográfica. In: 7º Congresso da Água, Portugal, 2003.
- CANHOLI, A. P. Drenagem Urbana e Controle de Enchentes. São Paulo: Ofício de Textos, 2005.
- CHRISTOFOLETTI, A. Modelagem de sistemas ambientais. São Paulo: Edgard Blucher, 1999. 236p.
- COLLISCHONN, W.; TASSI, R. Introduzindo Hidrologia. Porto Alegre: UFRGS/ IPH, 2008.
- CUNDERLIK, J. M.; SIMONOVIC, S. P. 2007. Inverse flood risk modelling under changing climatic conditions *Hydrol. Process.* **21**, 563–577.
- EMBRAPA. Levantamento de reconhecimento dos solos do Estado de Santa Catarina. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPS, 1998. CD-ROM – (EMBRAPA-CNPS. Boletim de Pesquisa; n. 6). ISSN 1415-3750.
- FENDRICH, R. Canais de Drenagem em Pequenas Bacias Hidrográficas. Curitiba: O Autor, 2008.
- FIUZA, F. 2008. Delimitação de zonas inundáveis. In: 5º Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia e 2º Congresso de Engenharia de Moçambique. Maputo, 2008.
- FLEMING, M.; NEARY, V. 2004. Continuous hydrologic modeling study with the Hydrologic Modeling System. *Journal of Hydrologic Engineering* **9**(3): 175–183.
- GONTIJO, N. T. Avaliação das Relações de Frequência entre Precipitações e Enchentes Raras por Meio de Séries Sintéticas e Simulação Hidrológica. Belo Horizonte: UFMG – Tese de Mestrado, 2007.
- HAMMOURI, N.; EL-NAQA, A. 2007. Hydrological modeling of ungauged wadis in arid environments using GIS: a case study of Wadi Madoneh in Jordan. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, v. 24, n.2, p. 185-196.
- HELLER, L.; e PÁDUA, V. L. de. Abastecimento de Água para Consumo Humano. Belo Horizonte: UFMG, 2006.
- HERRMANN, M. L. P.; KOBIYAMA, M.; MARCELINO, E. V. Inundação gradual. In: HERRMANN, M. L. P. (Org.). Atlas de Desastres

- Naturais do Estado de Santa Catarina. Florianópolis: IOESC, 2007, p. 89-92.
- JANZEN, J. G. Modelos Matemáticos e Métodos Numéricos em Recursos Hídricos. São Carlo: USP – Departamento de Hidráulica e Saneamento, 2007. Material didático, Disponível em: <<http://albatroz.shs.eesc.usp.br/home.html>> Acessado em: 21/12/2009.
- KLEIN, R. M. Mapa fitogeográfico do Estado de Santa Catarina. Itajai: Herbario "Barbosa Rodrigues", 1978. 24p.
- KOBIYAMA, M.; FRUET, D.; LIMA, R.T.; MARSCHNER, S.; GUIMARÃES, L.M.R.; CHAFFE, P.L.B. Estudo hidrológico comparativo entre três pequenas bacias experimentais no município de Rio Negrinho - SC: (1) Descrição. In: Encontro Sul-Americano de Geomorfologia. Santa Maria: UFSM, Anais, 2004. 12p.
- KOBIYAMA, M.; MANFROI, O.J. Importância da modelagem e monitoramento em bacias hidrográficas. In: Curso de Extensão: O Manejo de bacias hidrográficas sob a perspectiva florestal. Curitiba : Curso de Eng. Florestal - UFPR, 1999. p. 111-118.
- MARCELINO, E. V.; GOERL, R. F.; RUDDORF, F. M. Distribuição espaço-temporal de inundações bruscas em Santa Catarina (Período 1980-2003). In: Simpósio Brasileiro de Desastres Naturais. Florianópolis: GEDN/UFSC, 2004. p. 554-564.
- MILDE, L.C.E.; MORAES, J.M.; MORTATTI, J.; FERRAZ, F.F.B.; GROppo, JULIANO. 2002. Modelo Espaço-temporal HEC-HMS: avaliação na Bacia de Drenagem de Analândia. Revista de Ciência & Tecnologia, V. 10, n° 19 – pp. 61-69.
- MOGES, S.A.; KATAMBARA. Z.; BASHAR, K. 2003. Decision support system for estimation of potential evapo-transpiration in Pangani basin. *Physics and Chemistry of the Earth* **28**: 927–934.
- NAGHETTINI, M. Engenharia de recursos hídricos. Belo Horizonte: UFMG, 1999.
- OLIVEIRA, V. S. Integração SIG e modelo de simulação de áreas inundáveis: Bacia do Rio Pararangaba. Tese de Mestrado. São José dos Campos: ITA, 2003.
- PISTOCCHI, A.; e MAZZOLI, P. Use of HEC-RAS and HEC-HMS models with ArcView for hydrologic risk management. In: iEMSs Conference, 2002.
- PORTELA, M. M. Modelação Hidrológica – Modelação e Planeamento de Recursos Hídricos. Instituto Superior Técnico, Lisboa 2006.

- PORTO, R. L. L.; FILHO, K. Z.; MARCELLINI, S. S. Escoamento Superficial: Análise do Hidrograma e Hidrograma Unitário. São Paulo: USP, 1999.
- RAMOS, C. L., *et al.* Diretrizes Básicas para Projetos de Drenagem Urbana no Município de São Paulo. Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica – FCTH, 1999.
- RAMOS, F. Drenagem de águas pluviais. Centro de Hidráulica e Hidrologia Parigot de Souza – CEHPAR/UFPR, Curitiba 1972.
- RAMOS, F., *et al.* Engenharia Hidrológica. Rio de Janeiro: ABRH; Editora da UFRJ, 1989.
- SANTA CATARINA. Atlas de Santa Catarina. Rio Janeiro: Aerofoto Cruzeiro. 1986. 173p.
- SHERMAN, L. K. Streamflow from rainfall by unit-graph method. *Engineering News Record*, p. 501-505, 1932.
- TAVARES, P. R. L.; CASTRO, M. A. H. de. Simulação de Perfis D'água e Planícies de Inundação Relacionados a Diferentes Cenários de Urbanização. In: XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2005, João Pessoa.
- TUCCI, C.E.M. Hidrologia: ciência e aplicação. Porto Alegre: Ed. da Universidade: ABRH: EDUSP, 1997.
- TUCCI, C.E.M. Modelos Hidrológicos. Porto Alegre: Ed. Universidade/ABRH, 1998.
- USACE-HEC (a). “Hydrologic Modeling System, HEC-HMS v3.3 – User’s Manual”, US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, September 2008.
- USACE-HEC (b). “Hydrologic Modeling System, HEC-HMS – Applications Guide”, US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, March 2008.
- USACE-HEC “Hydrologic Modeling System, HEC-HMS – Technical Reference Manual”. US Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, March 2000.
- YENER, M.K.; ŞORMAN, A.Ü.; ŞORMAN, A.A.; ŞENSOY, A.; GEZGİN, T. Modeling studies with HEC-HMS and runoff scenarios in Yuvacik Basin, Türkiye. In: International Congress on River Basin Management; Antalya, Turquia. March, 2007.
- YU, Z.; BARRON, E. J.; YARNAL. B.; LAKHTAKIA, M.N.; WHITE, R.A.; POLLARD, D.; MILLER, D.A. 2002. Evaluation of basin-scale hydrologic response to a multi-storm simulation. *Journal of Hydrology* **257**: 212–225.
- YU, Z.; LAKHTAKIA, M. N.; YARNAL, B.; WHITE, R. A.; MILLER, D. A.; FRAKES, B.; BARRON, E. J.; DUFFY, C.; SCHWARTZ, F.

W. 1999. Simulating the river-basin response to atmospheric forcing by linking a mesoscale meteorological model and a hydrological model system. *Journal of Hydrology* **218**:72–91.