

**Universidade Federal de Santa Catarina
Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental**

**GERAÇÃO DE MAPAS DE ÁREAS DE INUNDAÇÃO DA BACIA
HIDROGRÁFICA DO ALTO E MÉDIO RIO CUBATÃO DO
NORTE/SC COM APLICAÇÃO DO TOPMODEL**

Eduardo Pértile

**FLORIANÓPOLIS, (SC)
JULHO/2008**

**Universidade Federal de Santa Catarina
Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental**

**GERAÇÃO DE MAPAS DE ÁREAS DE INUNDAÇÃO DA BACIA
HIDROGRÁFICA DO ALTO E MÉDIO RIO CUBATÃO DO
NORTE/SC COM APLICAÇÃO DO TOPMODEL**

Eduardo Pértile

**Trabalho apresentado à Universidade
Federal de Santa Catarina para Conclusão
do Curso de Graduação em Engenharia
Sanitária e Ambiental**

**Orientador
MsC. Roberto Valmir da Silva**

**Co-Orientador
Prof. Dr. Masato Kobiyama**

**FLORIANÓPOLIS, (SC)
JULHO/2008**

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

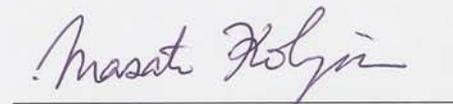
**GERAÇÃO DE MAPAS DE ÁREAS DE INUNDAÇÃO DA BACIA
HIDROGRÁFICA DO ALTO E MÉDIO RIO CUBATÃO DO NORTE/SC COM
APLICAÇÃO DO TOPMODEL**

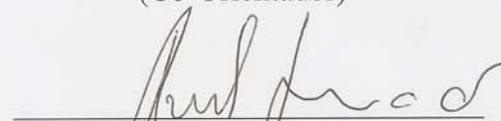
EDUARDO PÉRTILE

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

BANCA EXAMINADORA:


Msc. Roberto Valmir da Silva
(Orientador)


Prof. Dr. Masato Kobiyama
(Co-Orientador)


Prof. Dr. Davide Franco
(Membro da Banca)

**FLORIANÓPOLIS, (SC)
JULHO/2008**

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a minha família pela oportunidade e incentivo.

Ao meu Orientador Roberto Valmir da Silva e ao Co-Orientador Masato Kobiyama pela oportunidade oferecida.

Wivian Nereira Silva, Fabiano Antônio de Oliveira, CCJ-Comitê de Gerenciamento da Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão do Norte, Univille, pelo acervo científico da BHRC.

A todos os professores que contribuíram para minha formação.

Aos meus colegas e amigos pela força.

E a todos que de alguma forma contribuíram para a conclusão deste trabalho.

RESUMO

A Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão do Norte (BHRC), uma das principais bacias da região de Joinville e Garuva, localizada no estado de Santa Catarina, é responsável por cerca de 70% (setenta por cento) da água de abastecimento da cidade de Joinville e apresenta problemas históricos de inundações. Portanto, é de fundamental importância seu estudo, compreensão e preservação a fim de se obter um desenvolvimento sustentável dessa bacia hidrográfica. Esse trabalho tem por objetivo a demonstração das prováveis áreas de inundações da Bacia Hidrográfica do alto e médio Rio Cubatão do Norte, através de mapas de áreas de perigo de inundações para chuvas de diferentes tempo de retorno por meio do modelo hidrológico TOPMODEL. Foi realizado levantamento de séries históricas de precipitação, vazão e evapotranspiração da BHRC para o período de 06/04/2000 a 31/12/2007, as quais serviram como dados de entrada na simulação no TOPMODEL. O período de dados foi dividido em duas séries, sendo que a primeira série foi utilizada para calibração do TOPMODEL (06/04/2000 a 31/12/2004) e a segunda para sua validação (01/01/2005 a 31/12/2007). Como resultados da simulação foram gerados mapas de áreas saturadas, os quais foram utilizados, através de associação, para a confecção dos mapas de áreas de perigo de inundações. A simulação do TOPMODEL resultou em áreas saturadas mínimas e máximas. A área máxima de saturação para o período de calibração foi de 107,74 km² em 14/02/2001 e para o período de validação foi de 89,96 km² em 29/11/2006. Para o tempo de retorno de 5 anos a área de saturação máxima foi de 149,21 km², para 10 anos foi de 152,51 km², para 25 anos foi de 154,11 e para 50, 100 e 1000 anos foi de 154,18 km².

Palavras-chave: TOPMODEL, Rio Cubatão do Norte, inundações.

ABSTRACT

The Cubatão do Norte River watershed (BHRC) is one of the principal watersheds in Joinville e Garuva region, Santa Catarina state. The BHRC is responsible for about 70% of water supply for Joinville city and has suffered from flood since the foundation of this city. Therefore, it is very important to study it in order to understand and to preserve the BHRC for its sustainable development. The objective of the present study was to demonstrate flood areas of the BHRC under different climatic conditions by the hydrological model TOPMODEL. For the hydrological simulation, the time series data of precipitation, discharge and evapotranspiration in the BHRC were collected. This work aims to spatially distribute susceptible areas of flooding and landslides of the BHRC through relating saturated area maps estimated with the hydrological model TOPMODEL. It was conducted a survey of historical series of precipitation, evapotranspiration and flow of BHRC for the period from 06/04/2000 to 31/12/2007, which were used as input data on simulation in TOPMODEL. The period of data was divided into two series, the first one was used to calibrate the TOPMODEL (06/04/2000 to 31/12/2004) and the second one to validate the model (01/01/2005 to 31/12/2007). The simulation of TOPMODEL resulted in areas of minimum and maximum saturation. The maximum area of saturation for the period of calibration was 107,74 km² on 14/02/2001 and validation was 89,96 km² in 29/11/2006. For the times of return of 5, 10, 25 and 50 years the area of maximum saturation were 149.21 km², 152,51 km², 154,11 km² and 154, 18 km², respectively. For the times of 100 and 1000 the area of maximum saturation was the same for 50 years.

Key-words: TOPMODEL, Cubatão do Norte River, flood.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	8
2. OBJETIVOS	10
2.1. Objetivo geral	10
2.2. Objetivos específicos	10
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	11
3.1. TOPMODEL (TOPography based hydrological MODEL).....	11
3.1.1. Histórico	11
3.1.2. Conceitualização	11
3.1.3. Teoria	12
3.2. Mapas de áreas de perigo.....	14
3.3. Geoprocessamento e o Sistema de Informação Geográfica (SIG)	18
3.3.1. Descrição Geral do SIG	18
3.3.2. Estrutura geral de um SIG	18
3.3.3. Modelos Digitais de Elevação (MDE)	19
3.3.4. SIG GRASS (Geographic Resources Analysis Support System)	19
4. MATERIAIS E MÉTODOS	21
4.1. Caracterização da Área de Estudo	21
4.2. Dados hidrológicos	23
4.3. Aplicação do TOPMODEL	27
4.4. Confecção dos mapas de áreas de perigo de inundação da BHRC.....	29
5. RESULTADOS	31
5.1. Calibração	31
5.2. Validação	33
5.3. Simulação para diferentes tempos de retorno	35
5.4. Mapeamento de áreas de perigo.....	41
6. CONCLUSÕES	43
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44

1. INTRODUÇÃO

Ocorre uma intensificação dos prejuízos causados pelos desastres naturais devido principalmente às deficiências no planejamento urbano e à ocupação descontrolada de áreas de riscos. Dentre os principais desastres naturais se destacam os vendavais, tornados, granizos, escorregamentos, inundações, geadas e estiagens.

A Política Nacional de Defesa Civil conceitua desastre como sendo o resultado de eventos adversos, naturais ou provocados pelo homem, sobre um ecossistema (vulnerável), causando danos humanos, materiais e/ou ambientais, e conseqüentes prejuízos econômicos e sociais (DEFESA CIVIL, 2005).

Para conviver com os desastres naturais é fundamental entender cada fenômeno. O presente trabalho tem como escopo as inundações, as quais podem ser entendidas como o aumento do nível dos rios além da sua vazão normal, ocorrendo o transbordamento de suas águas sobre as áreas próximas a ele (KOBİYAMA *et al.*, 2006).

Segundo UN (2004) citado por Silveira (2008), as inundações causaram aproximadamente um terço do prejuízo econômico e foram responsáveis por dois terços das populações afetadas pelos desastres naturais no mundo.

O ser humano sempre buscou monitorar esse fenômeno hidrológico, através de observações, medições, modelos empíricos ou matemáticos, os quais proporcionaram uma melhoria tanto no conhecimento como no monitoramento desse fenômeno.

Segundo Kobiyama *et al.* (2006), existem dois tipos de medidas para os desastres naturais: as estruturais e as não-estruturais. No caso de inundações, as medidas estruturais modificam o sistema fluvial. As medidas não-estruturais são sistemas de alerta, mapeamento de área de risco, conscientização (educação ambiental), entre outros.

Conforme Lanna (1985) citado por Schult e Pinheiro (2003), as medidas não estruturais de controle das inundações envolvem regras de disciplinamento estabelecidas principalmente pelo setor público (municipal, estadual e federal), de maneira a permitir uma convivência com as inundações. Essas medidas são alcançadas pelo gerenciamento da bacia hidrográfica, em especial pelo gerenciamento das planícies de inundações.

O gerenciamento da planície de inundação é recomendável, principalmente para os casos em que a planície se encontra nas fases iniciais do processo de desenvolvimento urbano e industrial. Do ponto de vista hidrológico, o planejamento e ocupação do espaço inundável são feitos em função dos estudos hidrológicos sobre o regime de cheias e das expectativas de sua ocorrência. Esta ação de planejamento deveria estar traduzida através dos Planos Diretores municipais, com a definição dos riscos de ocupação para as faixas de superfície de inundação e da tipologia adequada das construções (SCHULT e PINHEIRO, 2003).

O presente trabalho, com o título de “Geração de mapas de áreas de inundação da Bacia Hidrográfica do alto e médio Rio Cubatão do Norte/SC com aplicação do TOPMODEL” busca ir ao encontro das atuais necessidades de conciliação do planejamento urbano e recursos hídricos.

A Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão do Norte (BHRC) é uma das principais bacias da região de Joinville e Garuva, no estado de Santa Catarina, sendo responsável por cerca de 70 % (setenta por cento) da água consumida pela cidade de Joinville.

A região apresenta problemas históricos de inundações. Segundo Silveira (2008), a probabilidade anual de ocorrência de inundações no município de Joinville é de 71% (setenta e um por cento). Portanto, é de fundamental importância o estudo da BHRC para a compreensão desse fenômeno, visando à adoção de medidas de utilização e ocupação sustentáveis. Neste contexto, analisar os registros em termos de tempo e espaço e simular precipitações com diferentes tempos de retorno é fundamental.

Esse trabalho tem por objetivo distribuir espacialmente as áreas de perigos a inundações através de associação às áreas saturadas por meio de modelagem hidrológica na Bacia Hidrográfica do alto e médio Rio Cubatão do Norte/SC.

Para tanto, foi realizado levantamento das séries históricas de precipitação, vazão e evapotranspiração da bacia para o período 06/04/2000 a 31/12/2007. Tais dados foram inseridos no modelo TOPMODEL permitindo a sua calibração e validação. Após essa etapa, foram gerados mapas de saturação para precipitações com diferentes tempos de retorno.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Descrever espacialmente as áreas de perigo a inundações através de associação às áreas saturadas por meio de modelagem hidrológica na Bacia Hidrográfica do alto e médio Rio Cubatão do Norte/SC.

2.2. Objetivos específicos

- Calibrar e validar o modelo TOPMODEL para a bacia.
- Estimar as vazões na bacia utilizando o TOPMODEL para diferentes tempos de retorno.
- Gerar mapas de áreas de perigo às inundações com base nos mapas de áreas saturadas para diferentes tempos de retorno.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. TOPMODEL (TOPography based hydrological MODEL)

3.1.1. Histórico

Segundo University of Lancaster (1988) citado por Santos (2001), o desenvolvimento do TOPMODEL foi criado pelo professor Mike Kirkby na Escola de Geografia, Universidade de Leeds, Conselho de Pesquisa de Ambiente Natural do Reino Unido, em 1974. Desde 1974 houve muitas versões do TOPMODEL desenvolvidas por Leeds, Lancaster e em outros lugares, mas nunca uma “versão definitiva”. Segundo os autores do modelo, essa ausência de versão definitiva é intencional, pois não se pretende que o TOPMODEL seja um tradicional modelo pacote, mas sim uma coleção de conceitos que podem ser usados apropriadamente em cada situação. Assim, existem hoje versões do programa adequadas à realidade e problemas específicos.

Segundo Santos (2001), a versão atual do TOPMODEL é distribuída por Keith Beven, mas os conceitos do TOPMODEL desenvolveram-se no decorrer de um período longo de tempo com contribuições de muitas pessoas que trabalharam na Universidade de Lancaster com o grupo de TOPMODEL. Uma versão do TOPMODEL para PC foi escrita originalmente em Fortran em 1985 e revisada para distribuição em 1993.

3.1.2. Conceitualização

Segundo Beven e Kirkby (1979), o TOPMODEL é um modelo hidrológico que está baseado na idéia de que a topografia exerce um controle dominante sobre o escoamento que se propaga em bacias hidrográficas.

Conforme Beven *et al* (1984), o TOPMODEL é um modelo chuva-vazão semi-distribuído baseado na área variável de contribuição. Este modelo é considerado semi-distribuído pelo motivo que somente os parâmetros relacionados à topografia são distribuídos, os demais parâmetros como precipitação e transmissividade são constantes para toda a bacia.

Segundo Santos (2001), o modelo usa o princípio de conservação de massa, isto é, a taxa de fluxo de entrada menos a taxa de fluxo de saída é igual à taxa de variação de armazenamento, para vários “reservatórios” em uma bacia, por exemplo, um “reservatório” de interceptação e um “reservatório” de solo.

A chuva abastece o reservatório de interceptação cuja capacidade, da ordem de alguns milímetros, depende do tipo de cobertura vegetal. As saídas do reservatório de interceptação são evaporação e precipitação não interceptada que se transforma em entrada para o reservatório de solo. A equação de conservação de massa novamente proporciona um método para calcular o balanço hídrico no reservatório de solo. Unindo as equações de balanço hídrico para todos os reservatórios hipotéticos na bacia, o cálculo do balanço hídrico e da propagação da água pode ser completado (SANTOS, 2001).

3.1.3. Teoria

Referenciando os trabalhos de Beven *et al.* (1995), Beven (1997), Beven (2001), Santos (2001) e Silva (2005), o presente trabalho apresenta uma forma resumida do TOPMODEL.

Em uma encosta demonstrada na Figura 1, o escoamento total ao canal é a soma do escoamento subsuperficial da encosta e do escoamento superficial das áreas saturadas:

$$q = q_b + q_s \quad (3.1)$$

onde q é o escoamento total ($\text{m}^3/\text{s} \cdot \text{m}^2$) = vazão(m^3/s) / área(m^2); q_b é o escoamento subsuperficial(m/s); e q_s é o escoamento superficial(m/s). Nota-se que neste modelo o escoamento sempre possui a unidade de velocidade.

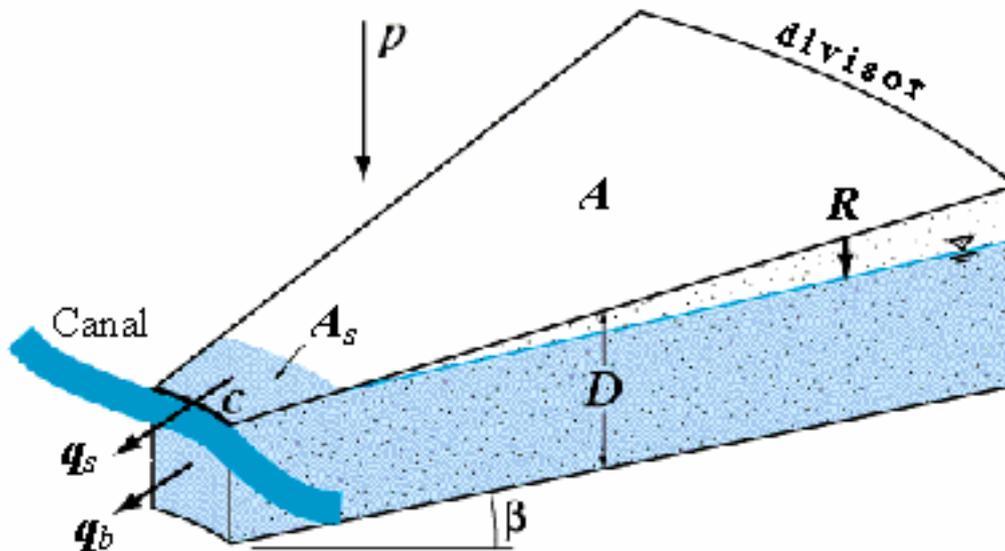


Figura 1 – Balanço hídrico de um segmento de encosta (Fonte: HORNBERGER *et al.*, 1998).

A Precipitação não interceptada (p) cai no segmento de área A e profundidade D . Uma porção, R , infiltra. O fluxo subsuperficial do segmento gera o escoamento subsuperficial (q_b). O fluxo de superfície, escoamento superficial (q_s), decorre de áreas saturadas (escoamento superficial por saturação ou escoamento de retorno). A declividade local ao ponto de saída, β , é considerada igual à declividade do lençol freático).

O escoamento subsuperficial é calculada como:

$$Q_b = T_0 \cdot e^{-\frac{s}{m}} \cdot c \cdot \tan \beta \quad (3.2)$$

onde Q_b é o escoamento subsuperficial (m^3/s); T_0 é a máxima transmissividade (m^2/s); m é o parâmetro de solo (m); s é o déficit de armazenamento (m); c é o comprimento do contorno (m); e $\tan \beta$ é o gradiente subterrâneo, sendo igual à declividade da superfície da encosta (m/m).

No modelo, o déficit de armazenamento de um ponto qualquer da bacia hidrográfica é igual ao déficit de armazenamento médio da bacia mais o parâmetro de solo, multiplicado pela diferença entre o índice topográfico médio e o índice topográfico local, isto é:

$$s = \bar{s} + m \cdot \left[\lambda - \ln \left(\frac{a}{\tan \beta} \right) \right] \quad (3.3)$$

onde \bar{s} é o déficit de armazenamento médio da bacia (m); $a = A/c$ é a área por unidade de contorno (m); e λ é o índice topográfico médio para a bacia, ou seja:

$$\lambda = \frac{1}{A} \sum \ln \left(\frac{a}{\tan \beta} \right) \quad (3.4)$$

onde A é a área total da bacia. Aqui, nota-se que o termo $\ln(a/\tan\beta)$ é chamado de índice topográfico.

A Figura 2 mostra a estrutura de armazenamento no solo, na qual existem uma zona de raízes, uma região de umidade inativa e o fluxo de percolação para a zona saturada.

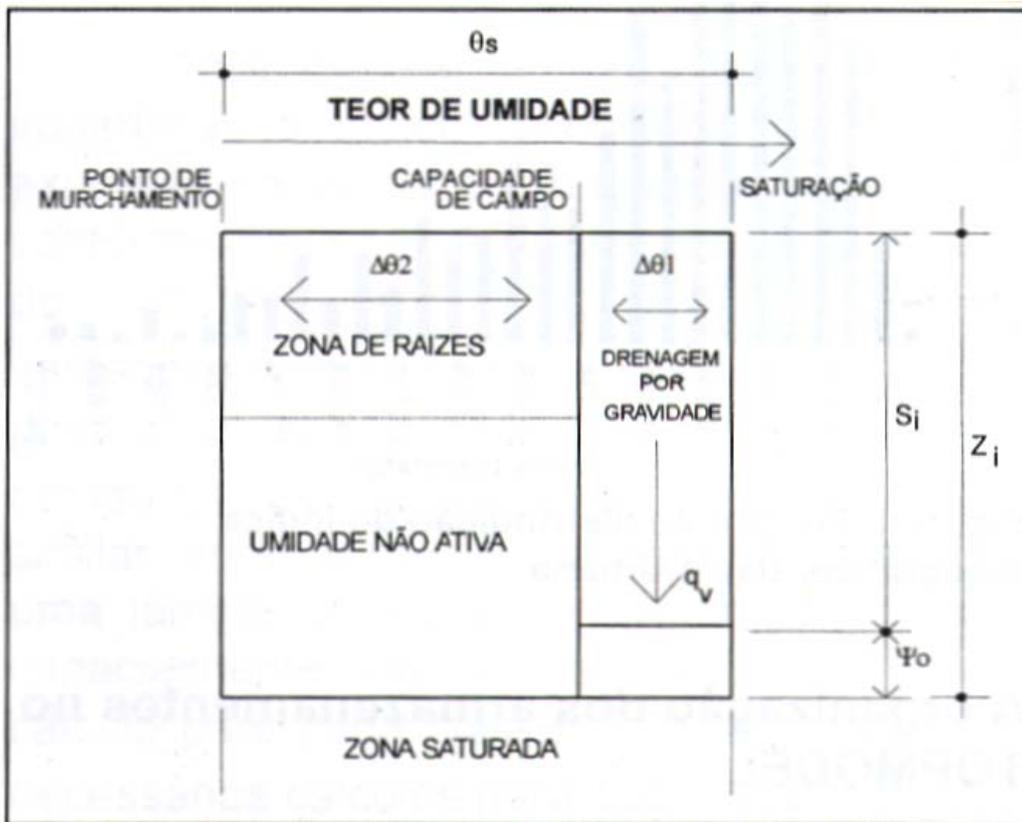


Figura 2 – Armazenamentos no solo (Fonte: SANTOS, 2001).

O modelo considera que a evapotranspiração real (E_r) é igual à evapotranspiração potencial (E_p) para áreas saturadas, assim como para a água que drena livremente na zona não-saturada. Quando a drenagem gravitacional cessa, a evapotranspiração pode ser calculada como:

$$E_r = E_p \left(1 - \frac{S_{zr}}{S_{r_{\max}}} \right) \quad (3.5)$$

onde S_{zr} é o déficit de armazenamento na zona de raízes (m); e $S_{r_{\max}}$ é o déficit ou capacidade de armazenamento máxima no solo (m) e é calculado como:

$$S_{r_{\max}} = z_{zr} (\theta_{cc} - \theta_{mp}) = z_{zr} (\Delta\theta_2) \quad (3.6)$$

onde z_{zr} é a profundidade efetiva na zona de raízes (m); θ_{cc} é a umidade volumétrica do solo em condições de capacidade de campo (m^3/m^3); θ_{mp} é a umidade volumétrica do solo no ponto de murcha permanente (m^3/m^3); e $\Delta\theta_2 = (\theta_{cc} - \theta_{mp})$.

Considera-se que o escoamento na bacia é propagado através de uma função distância-resposta e essa propagação é expressa pelo método da onda cinemática.

3.2. Mapas de áreas de perigo

Segundo Oliveira (1993) citado por Assad (1998), a observação e a representação da superfície da terra têm sido importantes na organização das sociedades. Desde a mais remota antiguidade até os tempos atuais, as informações espaciais têm sido descritas de forma gráfica pelos antigos cartógrafos e utilizadas por guerreiros, navegadores, geógrafos e pesquisadores. Com certeza, o que hoje se conhece como mapa nada mais é do que uma das mais antigas formas de comunicação visual de toda a humanidade.

Um exemplo ilustrativo da utilização dos mapas temáticos é o famoso mapa do doutor Snow que passou para a história como sendo um dos primeiros exemplos que ilustra bem o poder explicativo da análise espacial. Em 1854, Londres estava sofrendo uma grave epidemia de cólera, doença sobre a qual, na época, não se conhecia a forma de contaminação. Numa situação onde já haviam ocorrido mais de 500 mortes, o doutor Snow indicou no mapa da cidade a localização dos doentes e dos poços de água (naquele tempo, a fonte principal de água dos habitantes da cidade). Com base no mapa (Figura 3), o doutor Snow percebeu que a maioria dos casos estava concentrada em torno do poço da “Broad Street” e ordenou o seu lacre, o que contribuiu em muito para debelar a epidemia. Este caso forneceu evidência empírica para a hipótese (depois comprovada) de que o cólera é transmitido por ingestão de água contaminada (INPE, 2007).



Figura 3 - Mapa de Londres com casos de cólera (pontos) e poços de água (cruzes)
(Fonte: INPE, 2007, adaptado de E. Tufte, 1983).

No estado de Santa Catarina destaca-se o mapa temático do próprio Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão do Norte (CCJ), que desenvolveu um mapa de fragilidade a Enchentes da BHRC (Figura 4) levando em consideração a enchente ocorrida em Joinville e pesquisas com moradores, classificando a bacia em categorias de fragilidade (muito fraca, fraca, média, forte e muito forte).

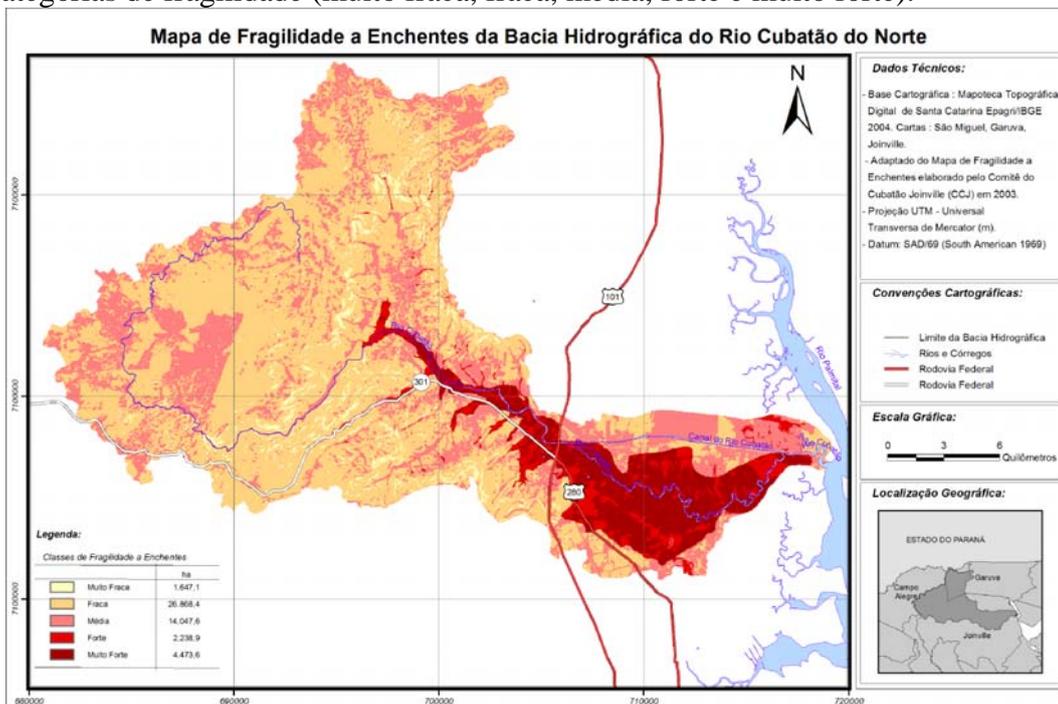


Figura 4 - Mapa de Fragilidade a Enchentes da BHRC (Fonte: GONÇALVES *et al.*, 2006).

Na Bacia Hidrográfica do Itajaí, historicamente muito atingida por enchentes, também se pode destacar a elaboração de mapeamento das áreas inundáveis como os citados por Schult e Pinheiro (2003). Pinheiro *et al.* (1987) elaboraram o mapeamento das áreas inundáveis para o município de Blumenau. Deschamps (1987) elaborou uma carta de enchente para o município de Gaspar e DNAEE (1987) elaborou as cartas de enchentes dos municípios de Apiuna, Blumenau, Brusque, Ibirama, Indaial, Rio do Sul, Taió e Timbó.

Destaca-se ainda o trabalho de Herrmann (2005) que desenvolveu o mapa de frequência de inundação gradual (Figura 5) e brusca (Figura 6) por município em Santa Catarina no período de 1980-2003. Observa-se que nos dois mapas, tanto de frequência de inundação gradual como de inundação brusca, os municípios de Joinville e Garuva são classificados com frequência muito alta, sendo Garuva o quinto município mais atingido por inundações bruscas e Joinville o oitavo.

A precipitação intensa é a principal causa das inundações fluviais, comportando-se como chuvas sazonais sobre amplas áreas geográficas, o que resulta nas inundações graduais; ou sob a forma de chuvas convectivas intensas sobre uma pequena bacia hidrográfica, o que resulta nas inundações bruscas (flash flood) (PENNING-ROUSELL, 1999; SMITH, 2000). Ou seja, as inundações graduais estão mais associadas as chuvas contínuas e prolongadas do que as chuvas intensas e concentradas (CASTRO, 2003). Para a Defesa Civil, a inundação gradual ocorre quando “... as águas elevam-se de forma paulatina e previsível; mantêm-se em situação de cheia durante algum tempo, e, a seguir escoam-se gradualmente.” (CASTRO, 2003). Assim, na inundação gradual a elevação e o fluxo d’água são lentos e, normalmente, também o rebaixamento, o que permite a adoção de algumas medidas preventivas e emergenciais. Por isso, alguns pesquisadores acreditam que a inundação brusca é mais problemática devido a sua rápida velocidade e violência (GEORGAKAKOS, 1986; MONTZ e GRUNTFEST, 2002).

Segundo Montz e Gruntfest (2002), as inundações bruscas diferem-se das inundações graduais em função das seguintes características: ocorrem de forma inesperada; movem-se rapidamente, quando associadas a um curso d’água; são geralmente violentas, com elevado potencial destrutivo; e apresentam uma área de impacto relativamente pequena.

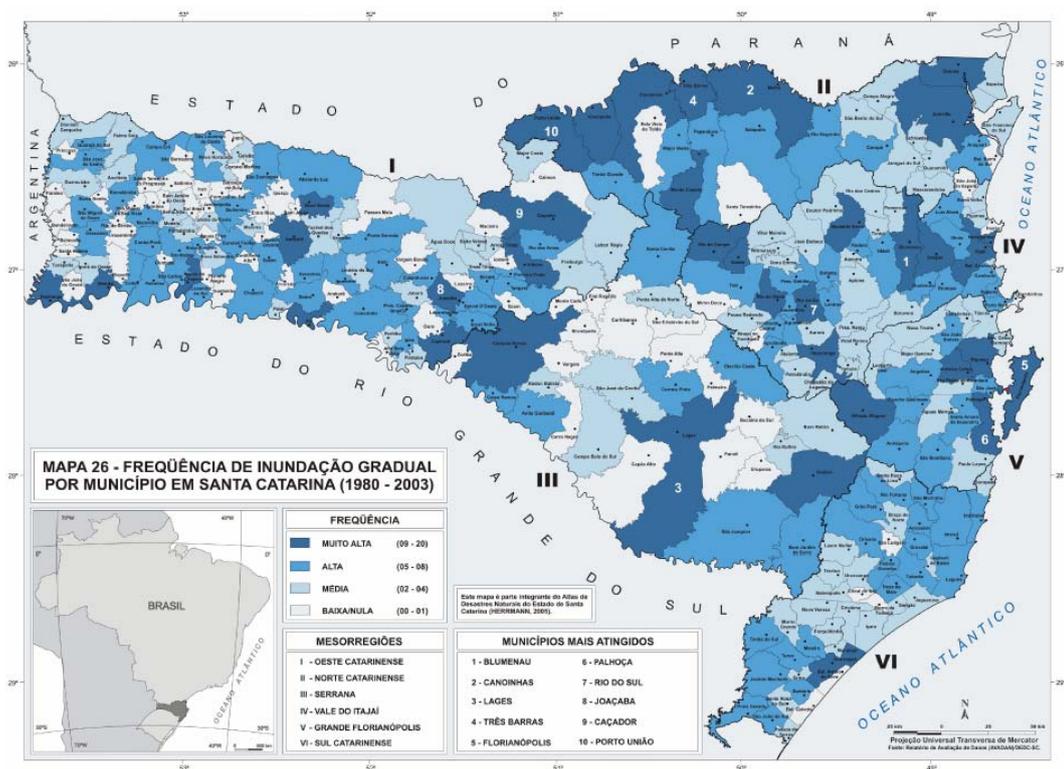


Figura 5 - Mapa de freq ncia de inunda o gradual por munic pio em Santa Catarina (Fonte: HERRMANN, 2005).

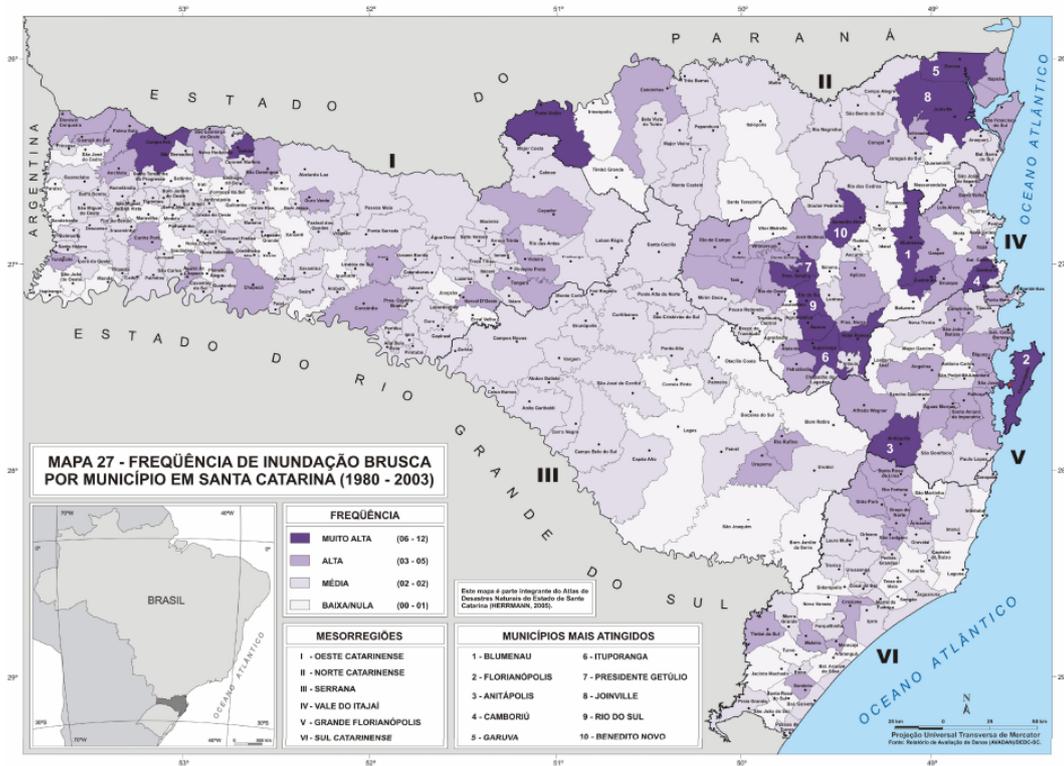


Figura 6 - Mapa de freq ncia de inunda o brusca por munic pio em Santa Catarina (Fonte: HERRMANN, 2005).

3.3. Geoprocessamento e o Sistema de Informação Geográfica (SIG)

O termo geoprocessamento denota uma área do conhecimento que utiliza técnicas matemáticas e computacionais para o tratamento de informações geográficas. Esta tecnologia tem influenciado de maneira crescente as áreas de cartografia, análise de recursos naturais, transportes, comunicações, energia e planejamento urbano e regional. É utilizado largamente como fonte de tomada de decisões sobre problemas urbanos e ambientais, pois é uma tecnologia de custo relativamente baixo (ASSAD, 1998).

Ainda segundo Assad (1998), os instrumentos computacionais do Geoprocessamento, chamados de Sistemas de Informações Geográficas, permitem a realização de análises complexas ao integrar dados de diversas fontes e ao criar bancos de dados georreferenciados.

3.3.1. Descrição Geral do SIG

Os Sistemas de Informações Geográficas referem-se àqueles sistemas que efetuam tratamento computacional de dados geográficos. Um SIG armazena a geometria e os atributos dos dados que estão georreferenciados, isto é, localizados na superfície terrestre e numa projeção cartográfica qualquer.

O que distingue um SIG de outros tipos de sistemas de informação são aquelas funções que possibilitam a realização de análises espaciais (geográficas). Tais funções utilizam os atributos espaciais e não-espaciais das entidades gráficas armazenadas na base de dados espaciais, buscando fazer simulações (modelos) sobre os fenômenos do mundo real, seus aspectos ou parâmetros (INPE, 2007).

O aspecto mais fundamental dos dados tratados em um SIG é a natureza dual da informação: um dado geográfico possui uma localização geográfica (expressa como coordenadas em um mapa) e atributos descritivos (que podem ser representados num banco de dados convencional). Outro aspecto muito importante é que os dados geográficos não existem sozinhos no espaço: tão importante quanto localizá-los é descobrir e representar as relações entre os diversos dados (INPE, 2007).

Conforme Assad (1998), há pelo menos três grandes maneiras de utilizar um SIG:

- Como ferramenta para produção de mapas;
- Como suporte para análise espacial de fenômenos; ou
- Como banco de dados geográficos, com funções de armazenamento e recuperação da informação espacial.

3.3.2. Estrutura geral de um SIG

Assad (1998), em uma visão abrangente, identifica os seguintes componentes num SIG:

- Interface com usuário;
- Entrada e interpretação de dados;
- Consulta, análise espacial e processamento de imagens;
- Visualização e plotagem; e

- Armazenamento e recuperação de dados.

3.3.3. Modelos Digitais de Elevação (MDE)

O termo MDE é utilizado para denotar a representação quantitativa de uma grandeza que varia continuamente em uma superfície real, a altimetria.

Burrough (1986) citado por INPE (2007), destaca que entre os usos de modelos digitais de elevação estão:

- Armazenamento de dados de altimetria para gerar mapas topográficos;
- Análises de corte-aterro para projeto de estradas e barragens;
- Cômputo de mapas de declividade e exposição para apoio a análises de geomorfologia e erodibilidade; e
- Apresentação tridimensional (em combinação com outras variáveis).

De acordo com Pettinati (1983), a criação do modelo matemático de uma superfície consiste no agrupamento de amostras (x,y,z) que descrevem a superfície real, de maneira que todo o conjunto simule de modo ideal o comportamento da superfície original.

Um exemplo de um MDE com sobreposição de imagem Landsat produzido por Oliveira (2006) referente à área de estudo do presente trabalho pode ser observado na Figura 7.

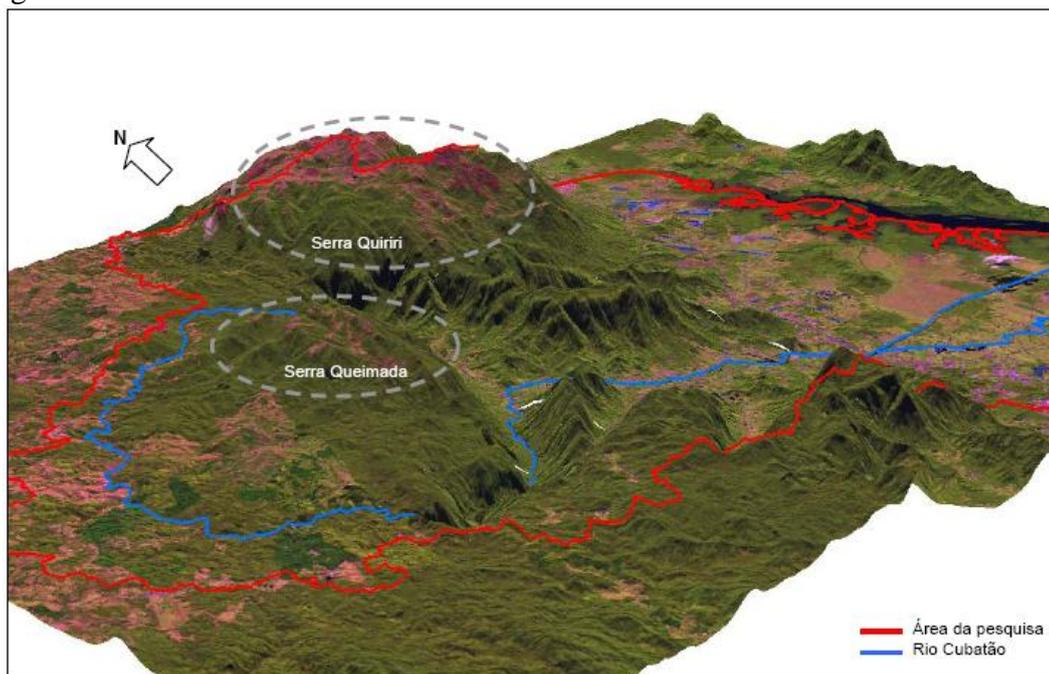


Figura 7 – Exemplo de um MDE com sobreposição de imagem Landsat
(Fonte: OLIVEIRA, 2006).

3.3.4. SIG GRASS (Geographic Resources Analysis Support System)

O SIG GRASS é um projeto de código aberto que oferece um ambiente integrado para análises vetoriais e matriciais, processamento de imagens e criação de gráficos e mapas (GROHMANN, 2004).

Huang (2003) desenvolveu visualizações em 3D para o TOPMODEL. A

equipe de desenvolvedores do SIG GRASS (Geographic Resources Analysis Support System, GRASS, 2006a) adicionou um módulo para simulações hidrológicas com o TOPMODEL.

Originalmente desenvolvido pelo *U.S. Army Construction Engineering Research Laboratories* (USA-CERL, 1982-1995), um ramo do *U.S. Army Corp of Engineers*, como ferramenta para gerenciamento do solo e planejamento ambiental pelo exército, O SIG GRASS tornou-se uma ferramenta poderosa com um amplo alcance de aplicações em muitas diferentes áreas da pesquisa científica. O SIG GRASS é atualmente usado em instituições acadêmicas e comerciais no mundo, assim como em muitas agências governamentais incluindo ASA, NOAA, USDA, DLR, CSIRO, *The National Park Service*, *The U.S. Census Bureau*, USGS e muitas companhias de consultoria (GRASS, 2006b).

O SIG GRASS é implementado em linguagem C e seus módulos basicamente se separam e módulos para vetores e matrizes. Cada módulo é independente e pode ser alterado sem implicações em outros módulos. Novos módulos podem ser também adicionados. Uma importante questão é que as implementações são feitas diretamente na linguagem C e não em pseudo-linguagens, como *scripts*, disponíveis em outros SIG. Isso traz toda as vantagens de um linguagem robusta coma a C assim como a possibilidade de acoplamento com bibliotecas escritas em C, como por exemplo bibliotecas estatísticas.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Caracterização da Área de Estudo

A Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão do Norte abrange os municípios de Garuva e Joinville, sendo que 80% (oitenta por cento) da bacia pertence à Joinville. A BHRC localiza-se na região nordeste do estado de Santa Catarina, a uma distância de 180 km da capital, Florianópolis (Figura 8).

A área total da bacia é de 492 km², com extensão do canal principal de 88 km. Sua nascente está situada na Serra Queimada, na cota altimétrica de 1.100 m, e sua foz, no estuário da Baía da Babitonga (GONÇALVES *et al.*, 2006).

O Rio Cubatão do Norte recebe contribuição dos seguintes tributários: Tigre, Jerônimo Coelho, Seco, Isaac, Prata, Fleith, Kundt, Lindo Alandf, do Braço, Mississippi, Campinas, Vermelho, Rolando, Rio do Meio e Quiriri, sendo este o maior contribuinte (GONÇALVES *et al.*, 2006).



Figura 8 – Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão do Norte.

Devido à conveniência de análise hidrológica com o TOPMODEL, o presente trabalho estabelece o exutório da BHRC como sendo o local da barragem, localizada próximo a BR-101 (Figura 9). As estações de monitoramento também estão demonstradas na Figura 9. Desta forma o trabalho concentra-se na simulação do alto e médio curso do Rio Cubatão do Norte. Conforme Oliveira (2006), a bacia em estudo possui uma área de 394,23 km² (80,13% da área total da BHRC) e uma extensão do canal principal 61,22 km (62,56% da extensão total do Rio Cubatão do Norte).



Figura 9 – Bacia Hidrográfica do Alto e Médio Rio Cubatão do Norte e as estações de monitoramento.

Segundo a EPAGRI (2002) citado por Gonçalves (2006), ocorrem no Estado de Santa Catarina dois tipos climáticos principais: o clima temperado chuvoso e moderadamente quente, úmido em todas as estações, com verão quente (Cfa), e o clima temperado chuvoso e moderadamente quente, úmido em todas as estações, com verão moderadamente quente (Cfb). Conforme classificação de Köppen, são encontradas na BHRC os tipos Cfb no alto curso e Cfa no baixo e médio cursos. A ocorrência dos tipos climáticos está relacionada à compartimentação topográfica da bacia hidrográfica, fato que influencia a distribuição da precipitação pluviométrica local e regional.

A temperatura média anual é de 22,41°C, sendo a média das máximas 25,73°C e a média das mínimas de 19,41°C, para os últimos 10 anos. A precipitação média anual é de 2.205,3 mm, sendo a menor média de precipitação no mês de junho, com 82,0 mm, e a maior média no mês de janeiro com 355,6 mm (LABORATÓRIO DE METEOROLOGIA DA UNIVILLE, 2006 apud IPPUJ, 2007).

A hidrografia apresenta seu sistema organizado predominantemente na vertente da Serra do Mar. É fortemente influenciada por aspectos estruturais e geomorfológicos, apresentando formato dendrítico, com leitos encachoeirados e encaixados em vales profundos, com vertentes curtas nos cursos superior e médio. Nas planícies de inundação, apresenta baixa declividade e grande sinuosidade natural (COMISSÃO DE POLÍTICAS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E DA AGENDA 21 MUNICIPAL, 1998).

As atividades produtivas na BHRC foram iniciadas com a construção da Estrada Dona Francisca, em março de 1858, que serviu de estímulo para a formação do distrito de Pedreira em 1859, o qual, a partir de 1933, passou a se chamar Pirabeiraba (HERKENHOFF, 1987).

Segundo Gonçalves e Oliveira (2001), na área de planalto houve a supressão de grandes áreas de mata nativa para a realização de reflorestamento com *Pinnus elliotis* na década de 1970, justamente nas áreas de nascente do Rio Cubatão. Por isso essas áreas constituíram o principal setor de desmatamento no ano de 1975.

O perímetro urbano na BHRC possui uma área de 4.398,12 ha, dos quais 1.925,10 ha estão representados pelo distrito industrial. É composto por uma área densamente habitada, representada pelos bairros Jardim Paraíso, Jardim Sofia, Jardim Kelly, Vila Cubatão, parte do Bom Retiro, distrito industrial e pela área de expansão urbana, onde as atividades agrícolas e pecuárias se mantêm em alguns locais, apesar da pressão imobiliária (GONÇALVES *et al.*, 2006). Joinville tornou-se um pólo regional, visto que várias cidades vizinhas, a exemplo de Araquari, São Francisco do Sul e Garuva, vêm implantando novas indústrias e muitas vezes os colaboradores destas vêm residir em Joinville.

Em síntese, as atividades produtivas restringem-se à preservação e à agrossilvicultura no alto e médio curso do Rio Cubatão e no baixo curso existe uma pressão de expansão do distrito industrial e do perímetro urbano de Joinville.

4.2. Dados hidrológicos

Os dados hidrológicos diários (vazão, precipitação e evapotranspiração) utilizados no presente trabalho foram obtidos de cinco estações as quais são: Abaeté, Quiriri, Univille, Aeroporto e Barragem (Figura 9). As Figuras 10 a 14 mostram essas cinco estações. Maiores informações sobre as estações estão descritas na Tabela 1.

Para o presente trabalho foram utilizados os dados compreendidos entre 06/04/2000 a 31/12/2007, os quais foram cedidos pelo Comitê de Gerenciamento da Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão do Norte (CCJ).



Figura 10 – Estação Hidrometeorológica Abaeté.



Figura 11 – Estação Hidrometeorológica Quiriri.



Figura 12 – Estação Meteorológica Univille.



Figura 13 – Estação Meteorológica do Aeroporto
(Fonte: INFRAERO - Setor de Meteorologia de Joinville).



Figura 14 – Estação Hidrológica da Barragem.

Tabela 1 – Informações sobre as Estações de Monitoramento.

Informação	Abaeté	Quiriri	Univille	Aeroporto	Barragem
UTM (X / Y)	688.632,62 / 7.102.755,05	708.654,68 / 7.101.038,37	714.045,08 / 7.094.273,48	698.421,41 / 7.115.896	709.093,03/ 7.101.061
Altitude	715 m	106,7 m	18 m	6 m	23 m
Tipo	Automática	Automática	Automática	Automática	Campanha
Classe	Hidro- Climatológica	Hidro- Climatológica	Climatológica	Climatológica	Hidrológica
Início da Atividade	25/10/02	11/10/02	08/1995	01/10/2000	Medições espaçadas
Responsável pela Estação	CCJ	CCJ	UNIVILLE	INFRAERO	UNIVILLE

O banco de dados de precipitação foi construído através de aplicação do Método de Thiessen com uso dos dados obtidos nas estações Abaeté, Quiriri, Univille e Aeroporto (Figura 15). O Método de Thiessen define zonas de influência de cada estação. Estas zonas de influência são determinadas através da união de postos adjacentes por linhas retas tomando-se, em seguida, as mediatrizes dessas retas que formarão polígonos, os quais são as áreas de influência de cada estação de monitoramento. Desta forma obtiveram-se dados diários médios da bacia, sendo que a unidade de precipitação foi convertida para metro.

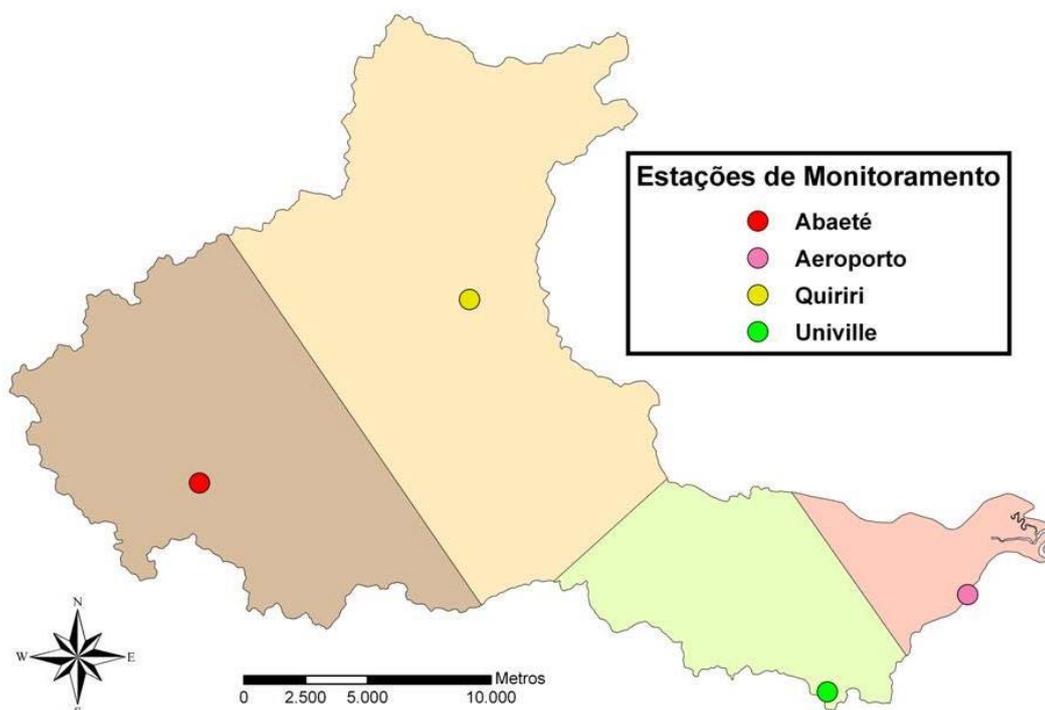


Figura 15 – Áreas de Influência de cada Estação segundo o Método de Thiessen.

Os dados de evapotranspiração potencial foram fornecidos pela Univille que a estimou com parâmetros meteorológicos monitorados na própria universidade. Considerou-se essa evapotranspiração diária como sendo a de toda a bacia e a unidade foi convertida para metro.

A vazão no local da Barragem do Rio Cubatão foi monitorada quase semanalmente, o que proporcionou ausência de dados diários.

O período de dados foi dividido em duas séries, a primeira foi utilizada para calibração do modelo TOPMODEL (06/04/2000 a 31/12/2004) e a segunda para sua validação (05/01/2005 a 31/12/2007).

A seguir são apresentados em formato de gráfico (Gráfico 1 e 2) as séries de dados de precipitação e evapotranspiração utilizados para a calibração e validação do TOPMODEL.

Gráfico 1 – Demonstração dos dados de entrada para o período de calibração.

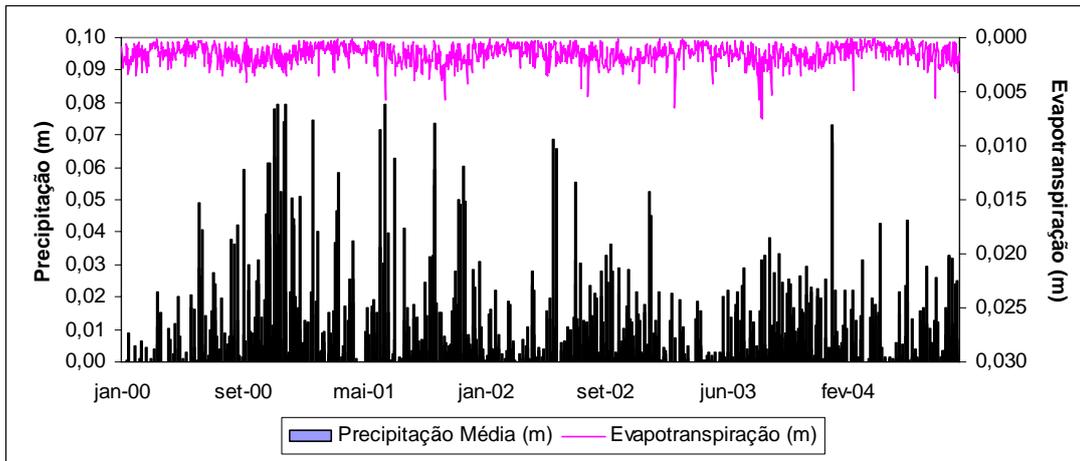
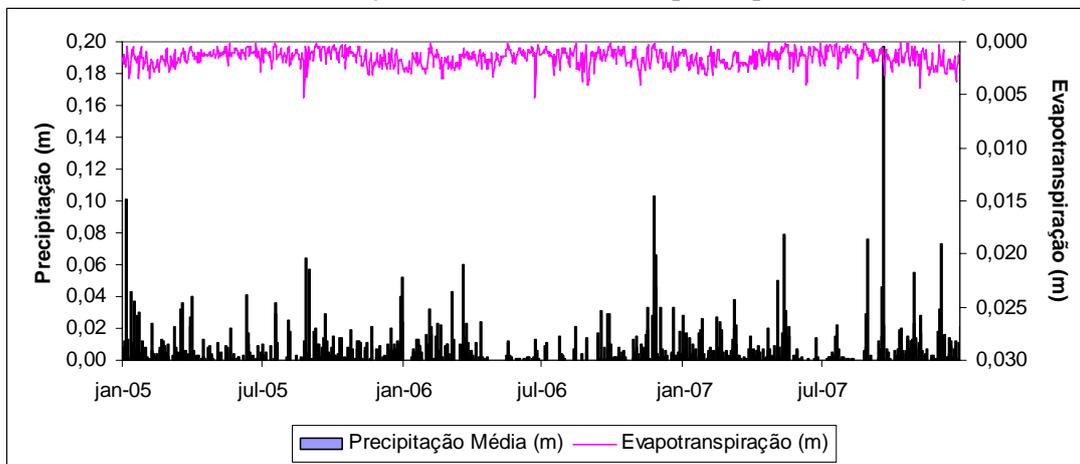


Gráfico 2 – Demonstração dos dados de entrada para o período de validação.



4.3. Aplicação do TOPMODEL

Primeiro, para gerar a distribuição do índice topográfico na bacia (Figura 17), foi utilizado o software GRASS (2006), conforme fórmula 3.4. A malha de células quadradas regulares foi gerada em resolução de 50 m a partir do MDE disponibilizado pela Epagri/Ciram com resolução espacial de 30 m.

A Figura 16 apresenta a distribuição espacial do índice topográfico da bacia de análise. O valor do índice variou de 3,5 a 22,0, o que representa a propensibilidade de saturação de cada área. Esse resultado representa bem a rede fluvial da bacia.

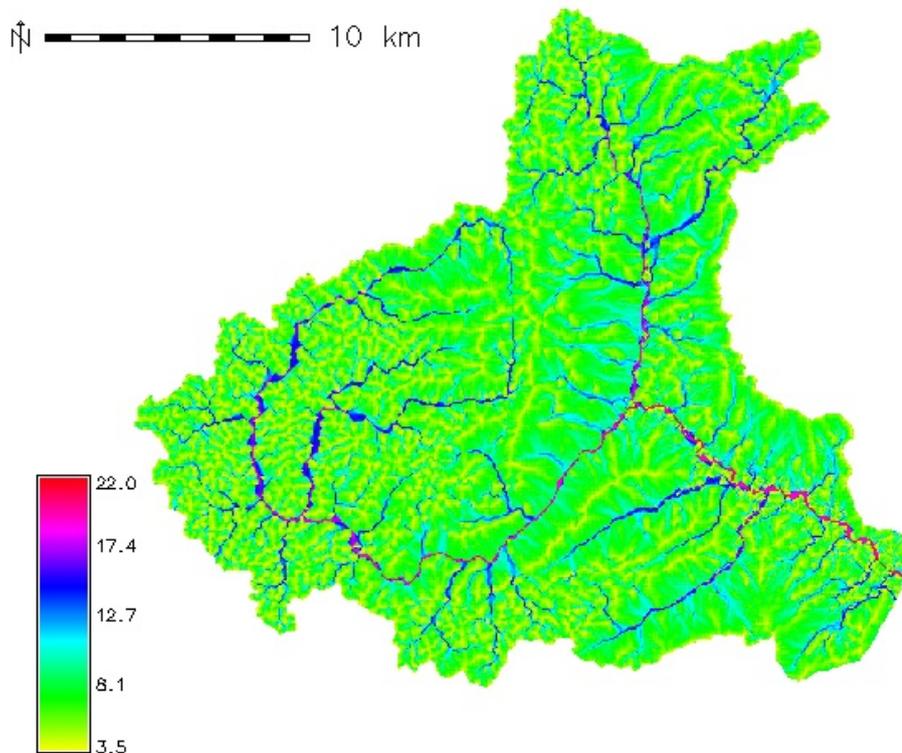


Figura 16 - Distribuição do índice topográfico.

Para determinar os sete parâmetros de entrada que exigem calibração com valores médios para a bacia (Tabela 2), foi utilizado o método GLUE (Generalized Likelihood Uncertainty Estimation) proposto por Beven & Binley (1992) e utilizado por Silva e Kobiyama (2007).

Tabela 2 - Parâmetros de entrada no TOPMODEL.

Parâmetro	Descrição	Unidade
m	Parâmetro da função de transmissividade exponencial ou curva de recessão	m
$\ln(T_0)$	Transmissividade efetiva do solo saturado	$m^2 h^{-1}$
SR_{max}	Capacidade de água na zona de raízes	m
SR_{init}	Déficit de armazenamento inicial na zona de raízes (proporção de SR_{max})	m
$ChVel$	Velocidade da propagação superficial (assume propagação linear)	$m h^{-1}$
Q_0	Vazão específica inicial observada da série	$m h^{-1}$
T_D	Tempo de permanência da água na zona não-saturada	$h m^{-1}$

Com base em Silva e Kobiyama (2007), o intervalo válido para cada parâmetro foi estabelecido e é apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 – Intervalo dos parâmetros

m [m]	$\ln(T_0)$ [$m^2 h^{-1}$]	T_D [$h m^{-1}$]	$ChVel$ [$m h^{-1}$]	SR_{max} [m]
0,00001 a 0,10	0,01 a 0,10	2 a 1000	300 a 1000	0,00001 a 0,1

Foram realizadas 1000 simulações para escolha do melhor conjunto de parâmetros. Para a função objetivo, o coeficiente de Nash para os logaritmos das vazões, NSlog, foi adotado:

$$NS_{\log} = 1 - \frac{\sum [\ln(Q_{obsi}) - \ln(Q_{cali})]^2}{\sum [\ln(Q_{obsi}) - \ln(\overline{Q_{obs}})]^2} \quad (4.1)$$

onde Q_{obsi} é a vazão observada; Q_{cali} é a vazão calculada; e $\overline{Q_{obs}}$ é a média da vazão observada.

Segundo Collischonn (2001), NSlog é adequado para verificar o desempenho do modelo na parte de recessão do hidrograma. Esta função foi escolhida pela escassez de dados observados.

As variáveis de entrada necessárias para calibração do modelo foram os dados diários de precipitação, vazão, e evapotranspiração potencial do período de 06/04/2000 a 31/12/2004. Após da calibração, a validação do modelo foi realizado para o período de 01/01/2005 a 31/12/2007.

O arquivo de saída basicamente apresenta a vazão superficial e sub-superficial para cada intervalo de tempo de toda a simulação, em colunas.

O TOPMODEL gerou um arquivo matriz o qual contém os valores do déficit para cada célula. Este arquivo foi inserido no SIG (GRASS) e transformado em um mapa de saturação do solo.

4.4. Confeção dos mapas de áreas de perigo de inundação da BHRC

A base cartográfica utilizada para elaboração das figuras foi a mapoteca topográfica digital de Santa Catarina, EPAGRI/IBGE 2004, sendo que os arquivos atualizados da delimitação da BHRC e dos recursos hídricos foram gentilmente cedidos pelo Professor Dr. Fabiano Antonio de Oliveira da Universidade da Região de Joinville - Univille.

Utilizando a matriz de saída do TOPMODEL e a base cartográfica citada acima, foram produzidos com auxílio do programa SIG os mapas de áreas de perigos de inundações da Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão do Norte para precipitações de diferentes tempos de retorno, através da associação das áreas saturadas. Os tempos de retorno adotados para o presente trabalho foram: 5, 10, 25, 50, 100 e 1.000 anos.

Para o cálculo das precipitações para os diferentes tempos de retorno da BHRC foi utilizada a equação de chuva de Joinville conforme Simões (2004):

$$i = \frac{24,843Tr^{0,1227}}{(t + 14)^{0,7999}} \quad (4.2)$$

onde i = intensidade (mm/min); Tr = período de retorno (anos) e t = duração da chuva (horas).

Para o tempo de concentração da Bacia Hidrográfica foi utilizado a fórmula SCS Lag (KOBAYAMA e SILVA, 2007), descrita a seguir:

$$Tc = 0,057(1000 / CN - 9)^{0,7} L^{0,8} S^{0,5} \quad (4.3)$$

onde Tc = tempo de concentração da bacia (h); CN = número da curva SCS; L = comprimento do talvegue (km) e S = declividade do talvegue.

Para o CN foi adotado o valor de 80, conforme sugerido por Silva e Kobiyama (2007). Desta forma, o tempo de concentração foi de aproximadamente 24 horas.

Foram calculadas e somadas as precipitações horárias referentes a cada tempo de retorno com duração total igual ao tempo de concentração da bacia (24 horas). Os resultados das precipitações para os diferentes tempos de retorno estão descritos na Tabela 4.

Tabela 4 - Valores da precipitação para diferentes Tempos de Retorno.

Tempo de Retorno (anos)	Intensidade (mm/d)
5	559,9
10	609,6
25	682,1
50	742,7
100	808,6
1.000	1.072,6

Para a vazão do Rio Cubatão foi necessário entrar com uma vazão inicial, desta forma foi utilizada a média das vazões observadas no período de aplicação do estudo (2000 a 2007), a qual foi de $1,26 \times 10^6$ m³/d. A evapotranspiração para o período das simulações dos tempos de retorno foi definida como nula.

5. RESULTADOS

5.1. Calibração

Aplicando o TOPMODEL para o período de 06/04/2000 a 31/12/2004 e com o intervalo válido conforme estabelecido na Tabela 3 foi obtido após 1000 simulações o melhor conjunto de valores para os 7 parâmetros de entrada do TOPMODEL para a área em estudo (Tabela 5). A calibração obteve um NS_{\log} (Fórmula 4.1) de 0,44. Utilizando esta função objetivo, o modelo dá a preferência no ajuste das vazões mínimas. O valor deste parâmetro foi calculado com base nas vazões observadas semanalmente, isto é, o desempenho do modelo foi avaliado apenas nos dias das vazões observadas.

Tabela 5 - Parâmetros de entrada no TOPMODEL.

Parâmetro	Descrição	Unidade	Valor Adotado
m	Parâmetro da função de transmissividade exponencial ou curva de recessão	m	0,09752
$\ln(T_0)$	Transmissividade efetiva do solo saturado	$m^2 h^{-1}$	0,09752
SR_{max}	Capacidade de água na zona de raízes	m	$8,822 \times 10^{-2}$
SR_{init}	Déficit de armazenamento inicial na zona de raízes (proporção de SR_{max})	m	$6,976 \times 10^{-2}$
$ChVel$	Velocidade da propagação superficial (assume propagação linear)	$m h^{-1}$	781,276
Q_0	Vazão específica inicial observada da série	$m h^{-1}$	0,0001262
T_D	Tempo de permanência da água na zona não-saturada	$h m^{-1}$	11,484

Usando os valores do índice topográfico espacialmente apresentados na Figura 16 e os parâmetros apresentados da Tabela 5, obtém-se a vazão calculada. Como comparativo é demonstrado na Figura 17 as vazões calculadas e as observadas para o período de calibração do TOPMODEL.

O baixo ajuste do modelo expresso pelo valor de NS_{\log} (0,44) pode ter ocorrido pela baixa qualidade das leituras de vazões observadas.

A simulação do TOPMODEL forneceu, além da vazão, área saturada. A Figura 18 demonstra a menor área saturada durante o período de calibração, a qual foi de 24,50 km² ocorrendo no dia 25/08/2000 (dia 142 da Figura 17). Já a Figura 19 ilustra a maior área de saturação máxima que apresentou área de 107,74 km² ocorrendo no dia 14/02/2001 (dia 315 da Figura 17).

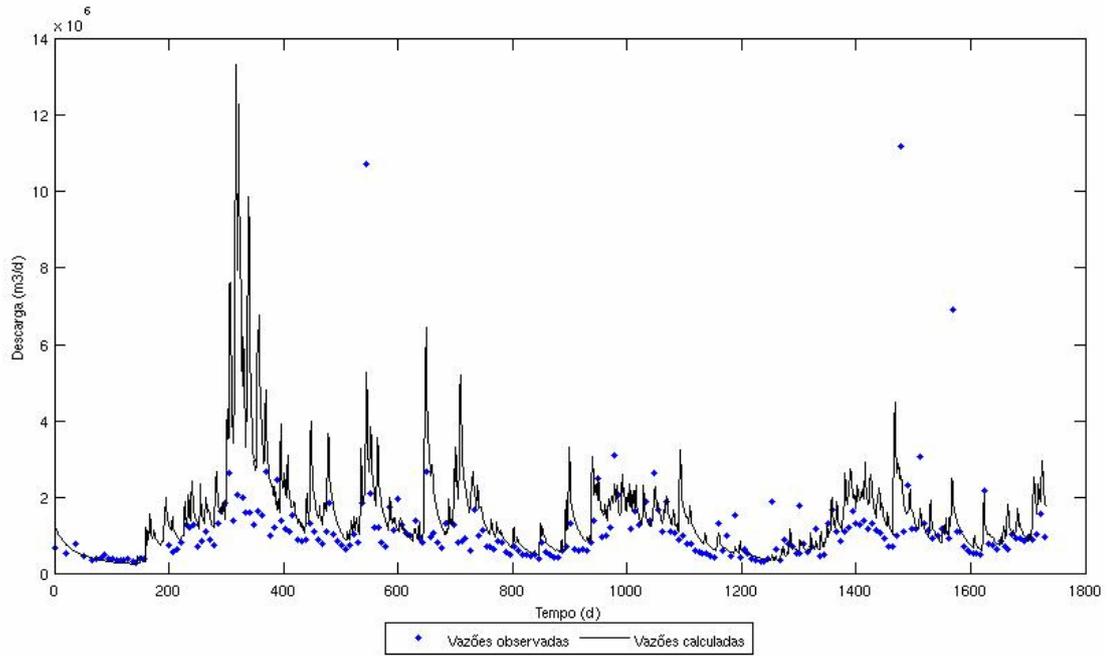


Figura 17 - Vazões observadas e calculadas da área em estudo para o período de calibração.

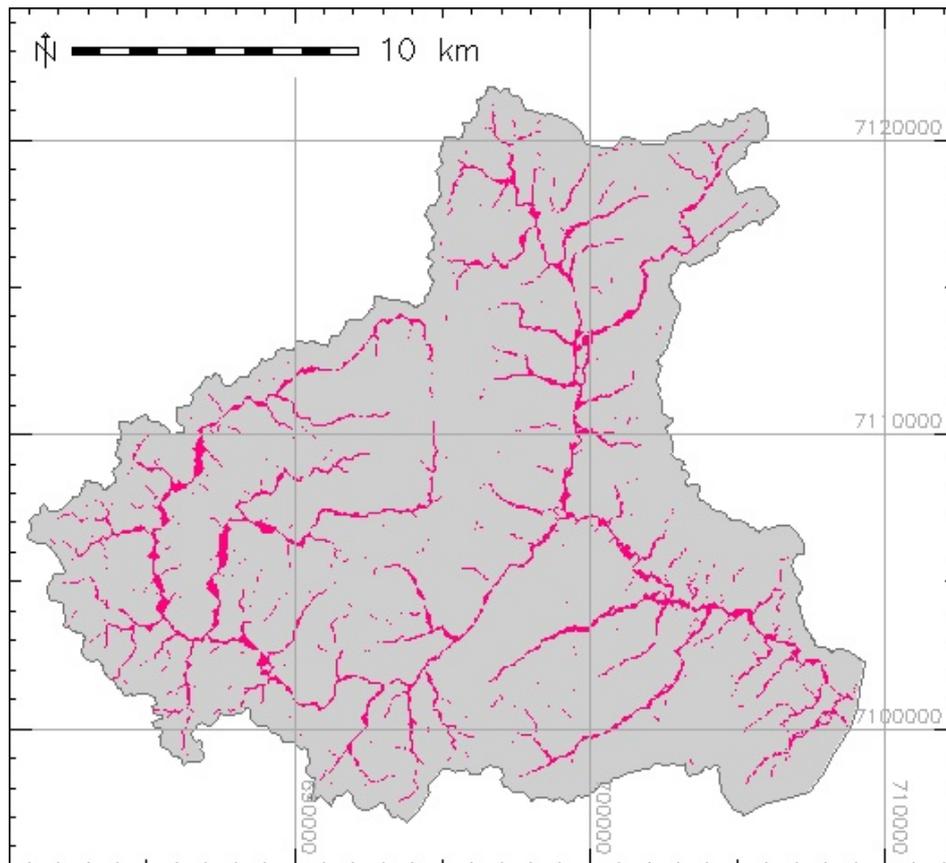


Figura 18 - Distribuição de áreas mínimas saturadas no período de calibração.

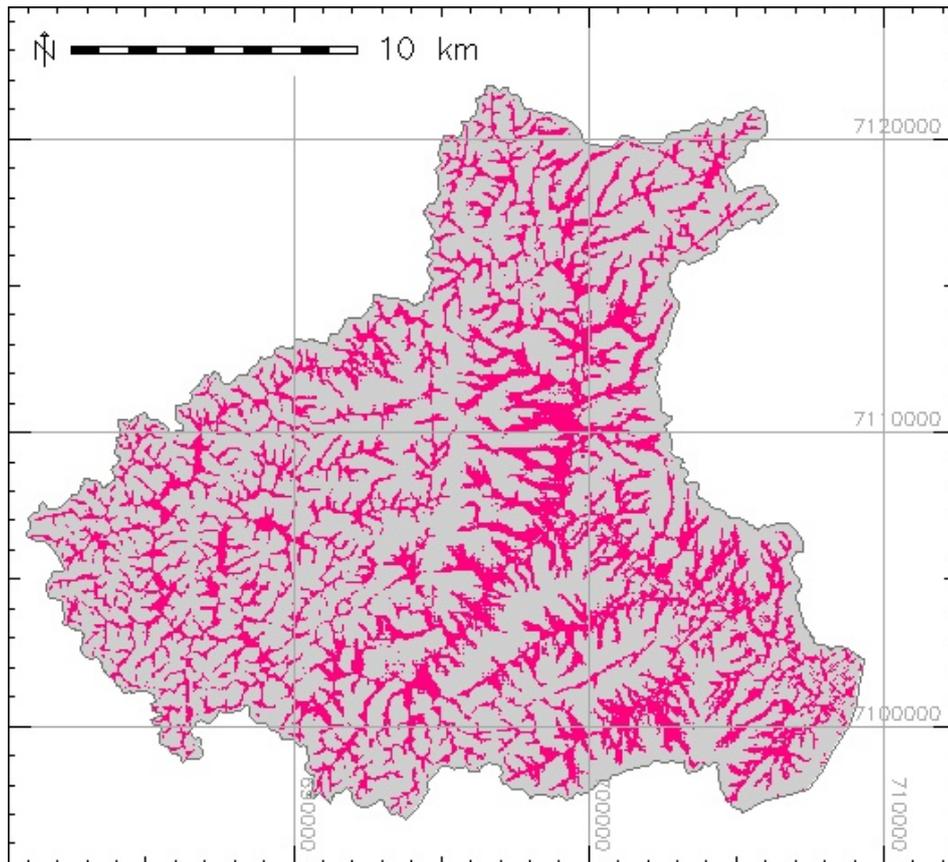


Figura 19 - Distribuição de áreas máximas saturadas na área no período de calibração.

5.2. Validação

Para a validação do TOPMODEL foram utilizados os dados de evapotranspiração, precipitação e vazão do período de 01/01/2005 a 31/12/2007 e os parâmetros determinados na calibração do modelo. Para a função objetivo, o coeficiente de Nash para os logaritmos das vazões, NS_{\log} foi de 0,43 (Fórmula 4.1).

Usando os valores do índice topográfico espacialmente apresentados na Figura 16 e os parâmetros apresentados da Tabela 5, obtém-se a vazão calculada para o período de validação. Como comparativo são demonstradas na Figura 20 as vazões calculadas e as observadas para o período de validação do modelo TOPMODEL.

A simulação do TOPMODEL resultou em, além da vazão, área saturada. A Figura 21 demonstra a menor área saturada durante o período de validação, a qual foi de 25,64 km² e ocorreu no dia 16/08/2006 (dia 589 da Figura 20). Já a Figura 22 ilustra a maior área de saturação máxima que apresentou área de 89,96 km², ocorrendo no dia 29/11/2006 (dia 694 da Figura 20).

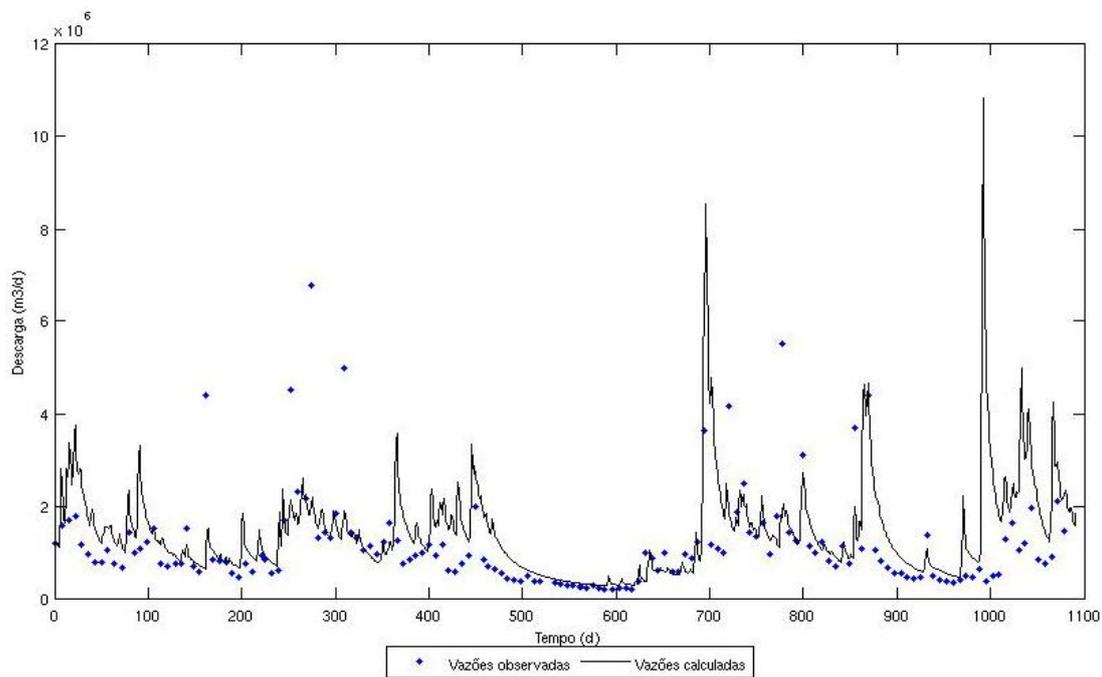


Figura 20 - Vazões observadas e calculadas da área em estudo para o período de validação.

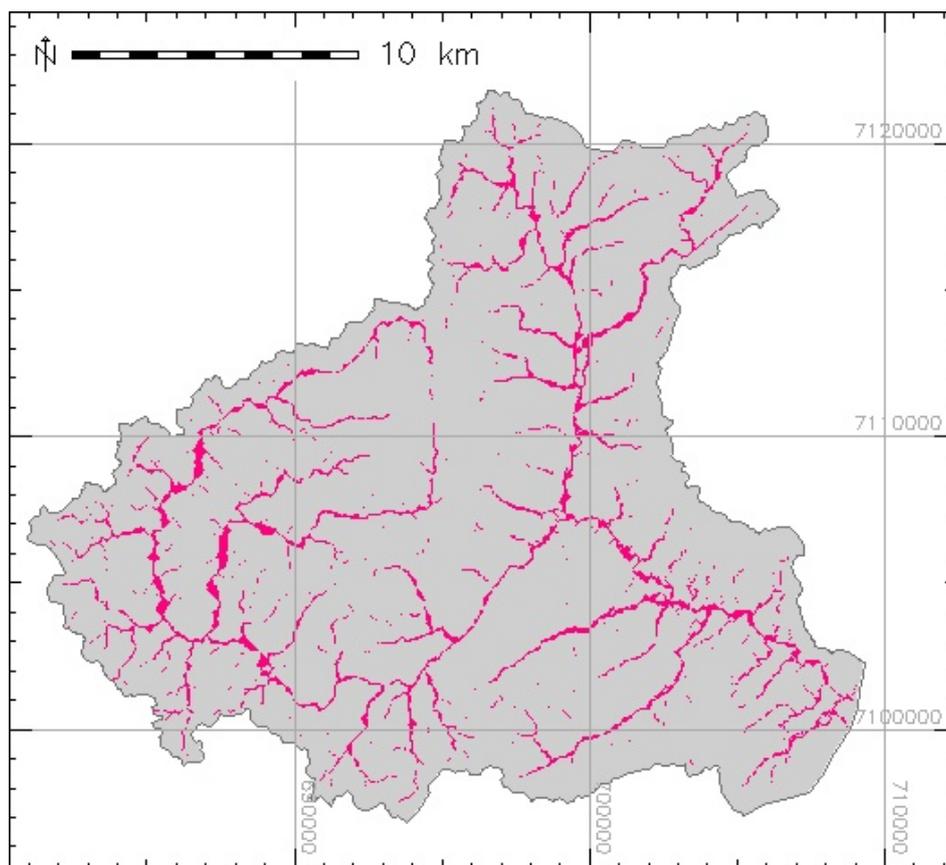


Figura 21 - Distribuição de áreas mínimas saturadas na área no período de validação.

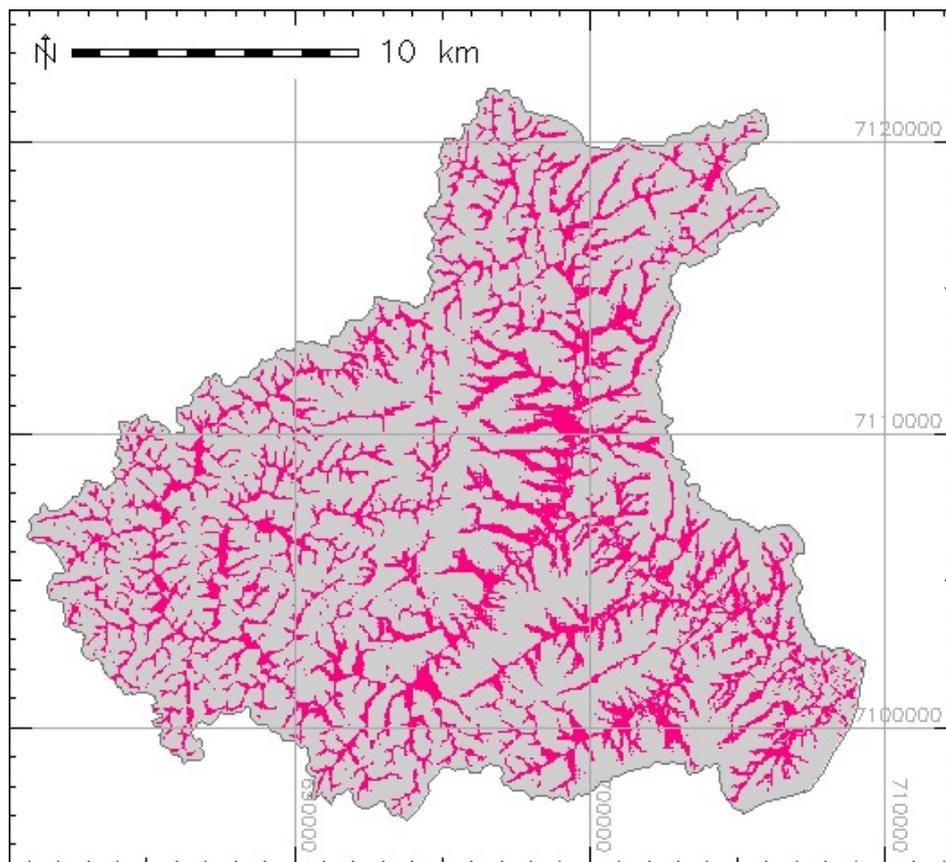


Figura 22 - Distribuição de áreas máximas saturadas na área no período de validação.

5.3. Simulação para diferentes tempos de retorno

Após a calibração e a validação do TOPMODEL para a área em estudo foi possível realizar as simulações para os diferentes tempos de retorno adotados nesse trabalho (5, 10, 25, 50, 100 e 1000 anos).

O resultado dessas simulações é apresentado na forma de figuras e de mapas de áreas saturadas (Figuras 23 a 32).

Para o tempo de retorno de 5 anos a área de saturação máxima foi de 149,21 km², para 10 anos foi de 152,51 km², para 25 anos foi de 154,11 e para 50, 100 e 1000 anos foi de 154,18 km². Os percentuais de áreas máximas saturadas em relação a área total da bacia foram de: 37,85%, 38,68%, 39,09%, 39,11%, 39,11%, 39,11%, respectivamente.

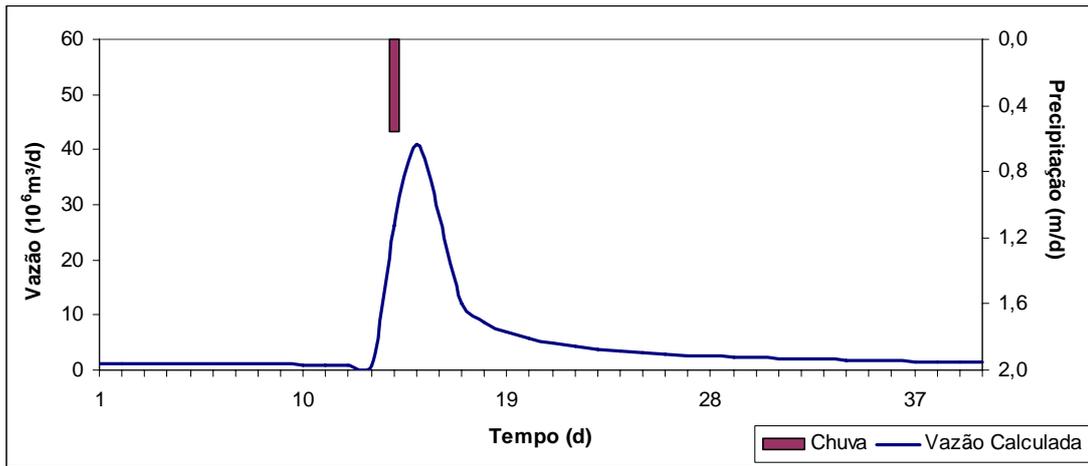


Figura 23 – Simulação para o tempo de retorno de 5 anos.

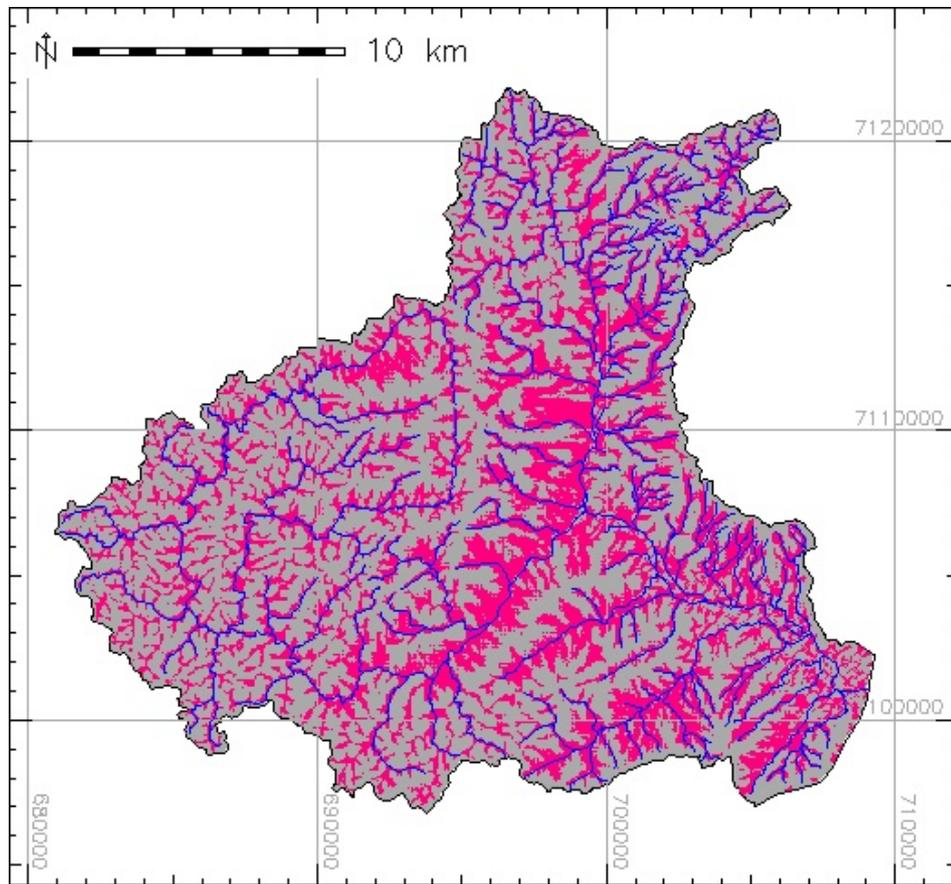


Figura 24 – Área máxima saturada para o tempo de retorno de 5 anos.

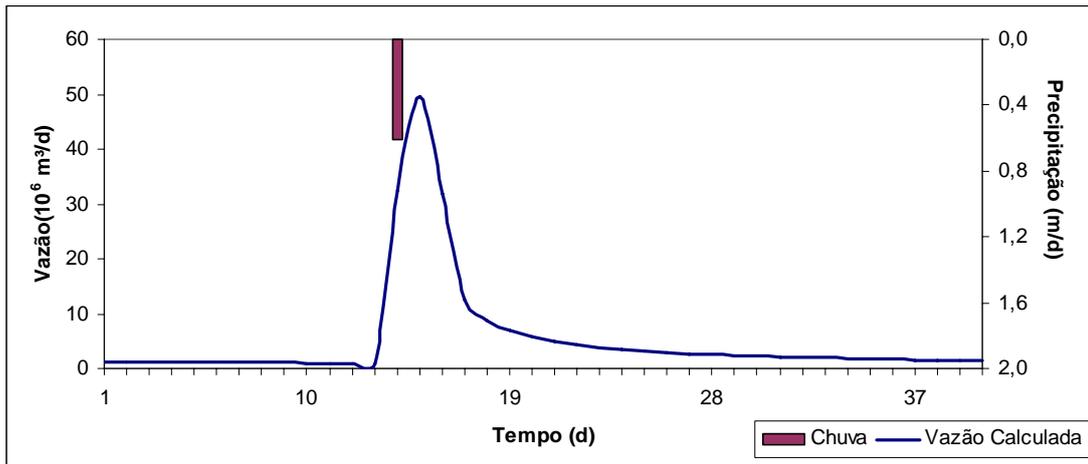


Figura 25 – Simulação para o tempo de retorno de 10 anos.

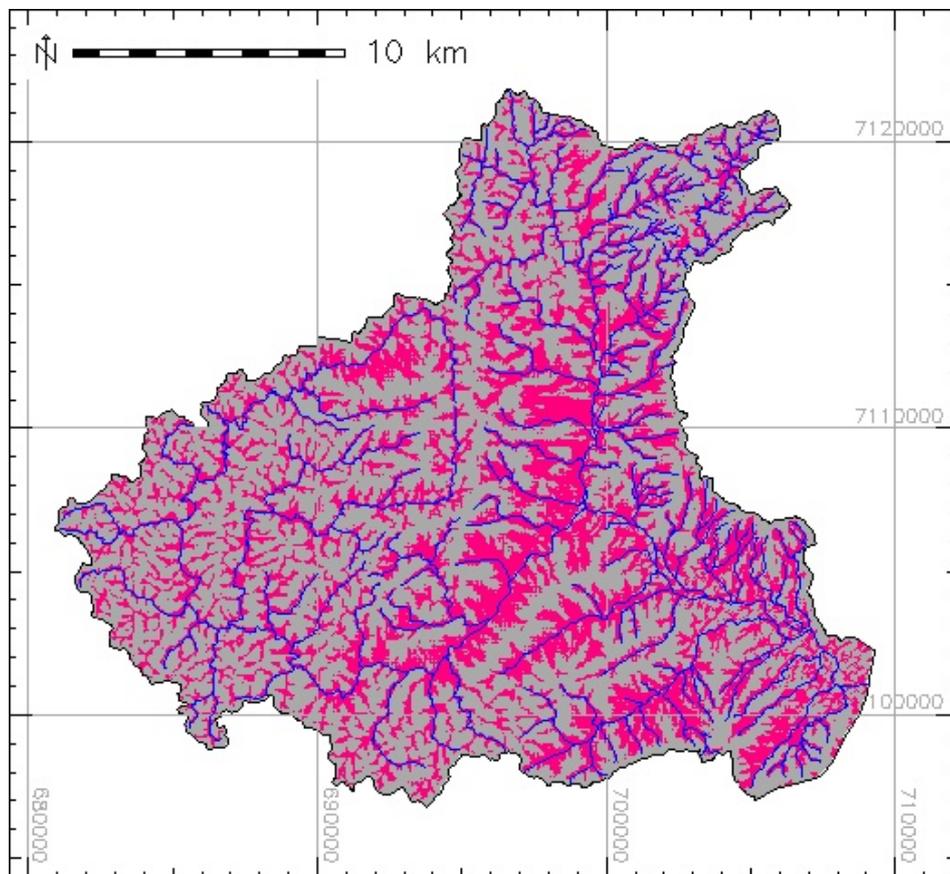


Figura 26 – Área máxima saturada para o tempo de retorno de 10 anos.

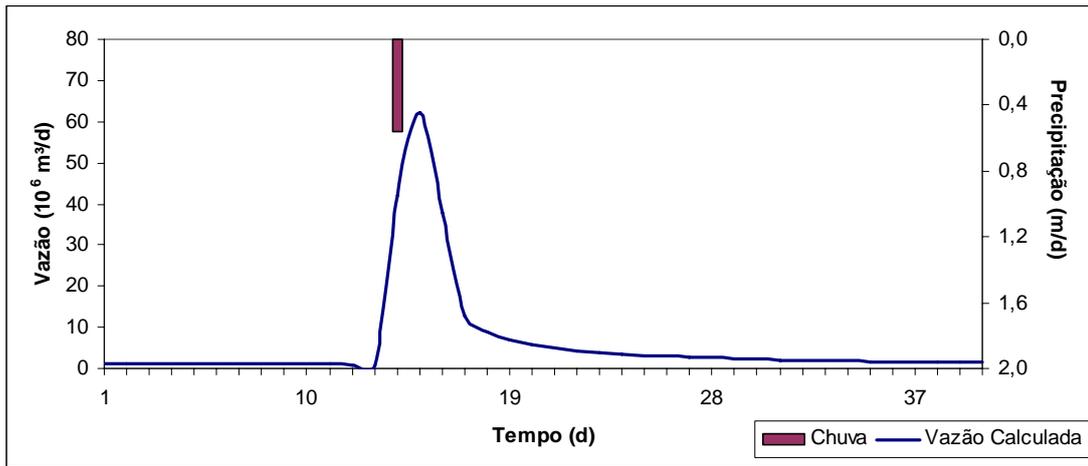


Figura 27 – Simulação para o tempo de retorno de 25 anos.

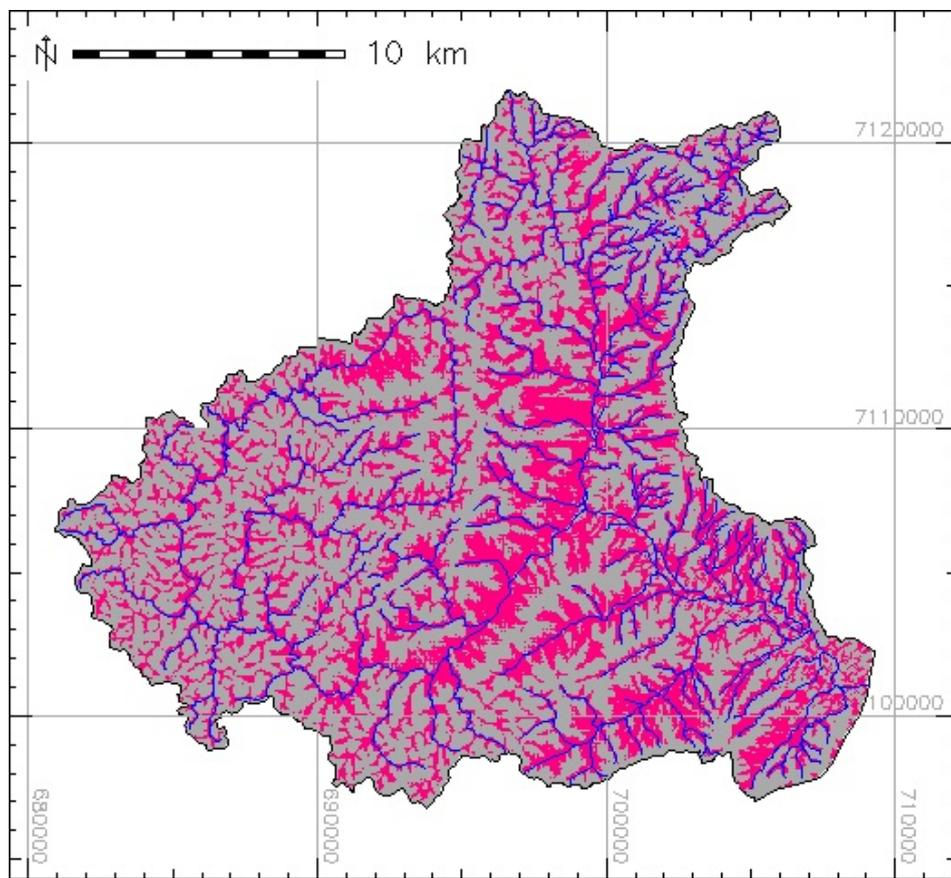


Figura 28 – Área máxima saturada para o tempo de retorno de 25 anos.

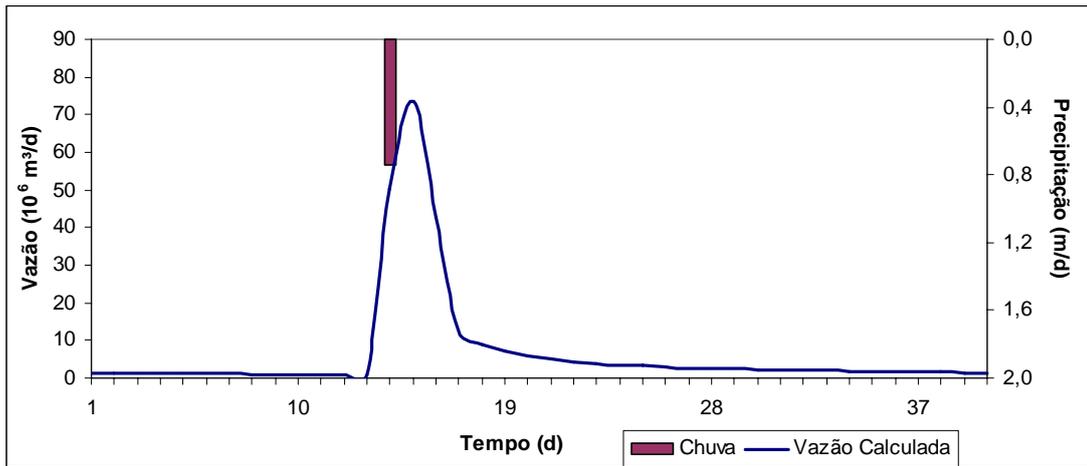


Figura 29 – Simulação para o tempo de retorno de 50 anos.

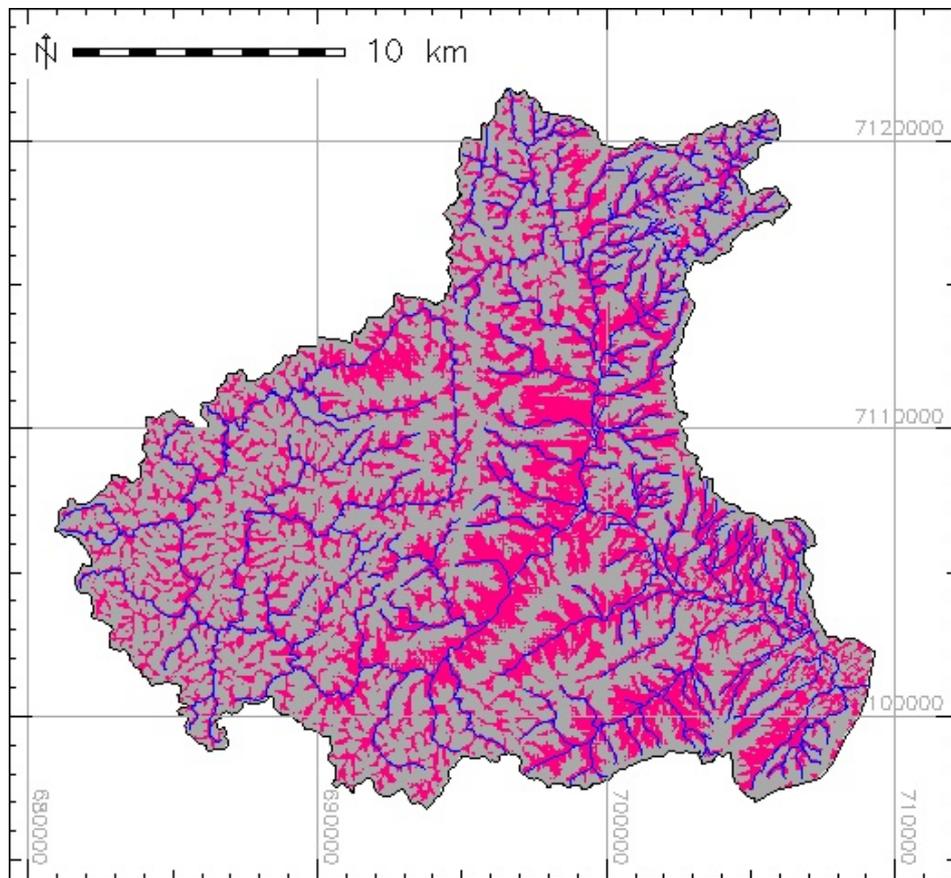


Figura 30 – Área máxima saturada para o tempo de retorno de 50 anos.

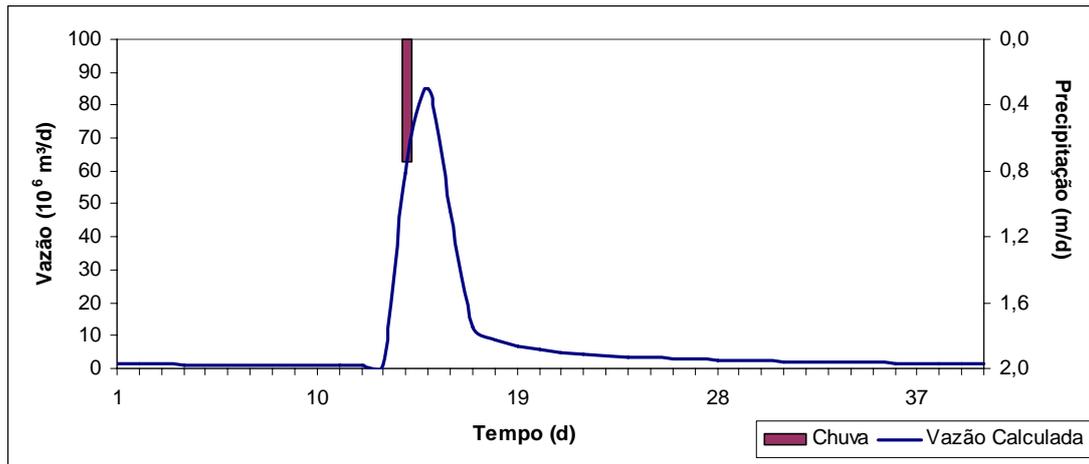


Figura 31 – Simulação para o tempo de retorno de 100 anos.

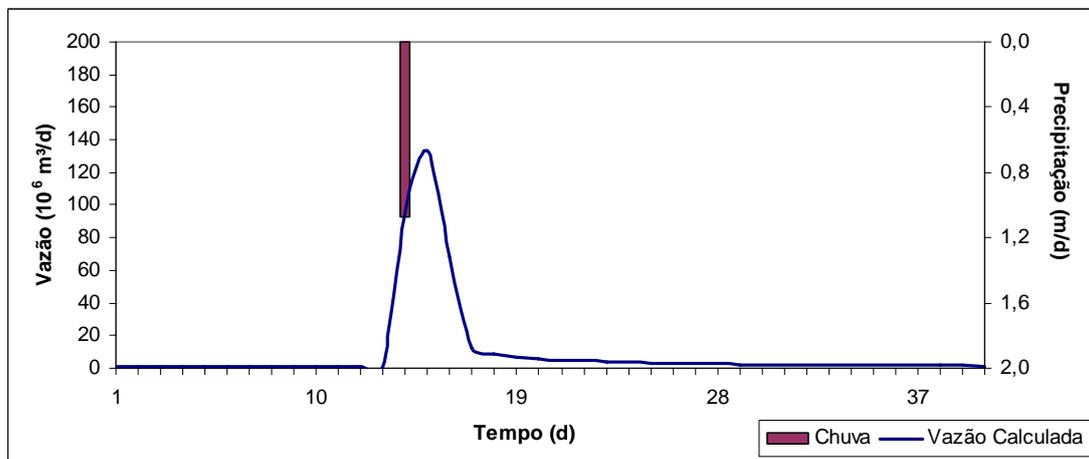


Figura 32 – Simulação para o tempo de retorno de 1000 anos.

Nessas simulações foi possível determinar além das áreas saturadas, as vazões de descarga para as condições simuladas. Os resultados das áreas máximas de saturação e de descarga máxima são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Valores máximos de área saturada e descarga para os tempos de retorno.

Tempo de Retorno (anos)	Área máxima de saturação (km ²)	Descarga máxima (10 ⁶ m ³ /d)
5	149,21	40,98
10	152,51	49,49
25	154,11	62,34
50	154,18	73,34
100	154,18	85,24
1000	154,18	132,90

Os valores de vazão calculados podem ser úteis para o dimensionamento de obras e o modelo TOPMODEL calibrado oferece uma alternativa a métodos clássicos de estimativa de vazão máxima como, por exemplo, o método racional e o hidrograma unitário à custa de novos parâmetros.

Foi verificado que não ocorreu um expressivo aumento da área máxima de saturação nas simulações realizadas. Isso se deve principalmente as características físicas da bacia hidrográfica em estudo, a qual possui alta declividade na parte alta e planícies na parte mais baixa. A área máxima de saturação foi alcançada já no tempo de retorno de 50 anos, porém apresentou somente um acréscimo de 4,97 km² do resultado obtido para o tempo de retorno de 5 anos. Isto significa que a bacia atinge sua saturação máxima com uma chuva de 50 anos. A diferença de vazões observadas na Tabela 6 se deve ao aumento do escoamento superficial, as quais podem ser observadas nas Figuras 24, 26, 28, 30, 32 e 33.

5.4. Mapeamento de áreas de perigo

Com base nos mapas de áreas saturadas geradas através do modelo TOPMODEL foi feita uma associação às áreas de perigo. Foram consideradas como áreas de perigo as áreas susceptíveis a inundações e as áreas susceptíveis a deslizamentos. Áreas susceptíveis a inundações geralmente são áreas próximas a rios e com baixas declividades. As áreas a deslizamento são áreas com declividades acentuadas. Desta forma foi feito uma sobreposição do mapa de área saturada para 50 anos com o mapa de declividades. O resultado da sobreposição é apresentado na Figura 33.

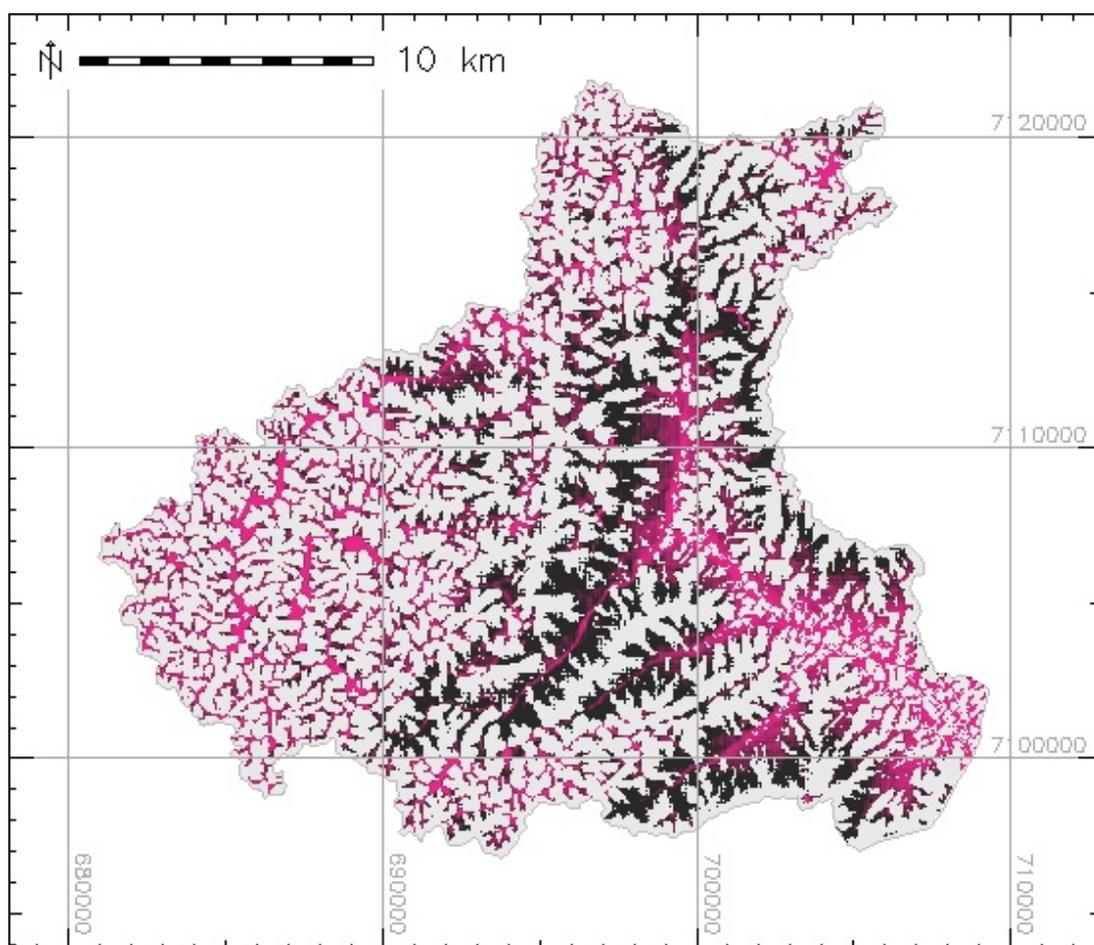


Figura 33 – Mapa de área de perigo da área em estudo.

Através da Figura 33 observa-se que as áreas mais escuras são áreas de alta declividade e saturadas e, portanto, áreas susceptíveis a deslizamento. As áreas mais claras são áreas de baixa declividade e saturadas e, portanto, áreas susceptíveis a inundações, principalmente aquelas localizadas próximas a rios.

6. CONCLUSÕES

A calibração (06/04/2000 a 31/12/2004) do modelo TOPMODEL apresentou baixo ajuste, expresso pelo valor de NS_{\log} (0,44), isto pode ter ocorrido pela qualidade das leituras das vazões observadas.

Na validação do modelo (01/01/2005 a 31/12/2007) foi possível verificar a eficiência de calibração. Observou-se que o modelo apresentou bons resultados em relação a calibração para o período analisado.

Os resultados das simulações para os diferentes tempo de retorno podem ser úteis para o dimensionamento de obras e o modelo TOPMODEL calibrado oferece uma alternativa a métodos clássicos de estimava de vazão máxima como, por exemplo, o método racional e o hidrograma unitário à custa de novos parâmetros.

Foi verificado que não ocorreu um expressivo aumento da área máxima de saturação nas simulações realizadas. Isso se deve principalmente as características físicas da bacia hidrográfica em estudo, a qual possui alta declividade na parte alta e planícies na parte mais baixa. A área máxima de saturação foi alcançada já no tempo de retorno de 50 anos, porém apresentou somente um acréscimo de 4,97 km² do resultado obtido para o tempo de retorno de 5 anos. Isto significa que a bacia atinge sua saturação máxima com uma chuva de 50 anos.

O produto final do presente trabalho foi o mapa de áreas de perigos, o qual demonstra as áreas mais susceptíveis a deslizamentos e inundações. Sendo que as áreas com maior declividade (alto Rio Cubatão) são áreas mais susceptíveis a deslizamento e as áreas com baixa declividade (médio Rio Cubatão) são áreas mais susceptíveis a inundações, principalmente aquelas localizadas próximas a rios.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSAD, E. D. (1998). **Sistema de informações geográficas. Aplicações na agricultura**. 2ª.ed., rev. e ampl. – Brasília : Embrapa – SPI / Embrapa-CPAC, 1988, 434p.

BEVEN, K. J. **TOPMODEL User Manual - Windows Version 97.01**. Lancaster: Universidade de Lancaster, 1997. <http://www.es.lancs.ac.uk/hfdg/topmodel.html>.

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

BEVEN, K.J.; KIRKBY, M.J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. **Hydrological Sciences Bulletin**, v.24, n.1, p.43-69, 1979.

BEVEN, K.J.; KIRKBY, M.J.; SCHOFIELD, N.; TAGG, A.F. Testing a Physically-based flood forecasting model (Topmodel) for three U.K. catchments. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v.69, p.119-143, 1984.

BEVEN, K. J; LAMB, R.; QUINN, P.; ROMANOWICZ, R.; FREER, J. Topmodel. In: SINGH, V. P. (Ed.) **Computer models of watershed hydrology**. Water Resource Publication, 1995. p. 627-668.

Cartas topográficas da Mapoteca Digital de Santa Catarina Epagri/ IBGE (2004). Disponível em: <<http://www.epagri.rct-sc.br>> Acesso em: 17 nov. 2007.

CASTRO, A. L. C. **Manual de Desastres: desastres naturais**. Brasília: Ministério da Integração Nacional, 2003. 174 p.

COLLISCHONN, W. **Simulação hidrológica de grandes bacias**. Porto Alegre: UFRGS, 2001. 194p. (Tese de doutorado em Engenharia).

COMISSÃO DE POLÍTICAS DE DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E DA AGENDA 21 MUNICIPAL. **Agenda 21 Municipal: compromisso com o futuro**. 2. ed. rev. Joinville: PMJ, 1998. 143 p.

DEFESA CIVIL (2005). **Formação em Defesa Civil: construindo comunidades mais seguras**. Curso a Distância. 2ª Edição Ed. Lagoa Editora Ltda, 135p.

Glossário de Termos Hidrológicos (2002). Versão 2.0.1. Agência Nacional da Águas – ANA. Disponível em: http://www.ana.gov.br/gestaoRecHidricos/TecnologiaCapacitacao/tecnologia_glossario.asp>. Acesso em 18 nov. 2007.

FUNDAÇÃO INSTITUTO DE PESQUISA E PLANEJAMENTO PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DE JOINVILLE – IPPUJ. **Joinville – Cidade em Dados 2007**. Caderno. Joinville, PMJ, 2007. 147 p.

GEORGAKAKOS, K. P. **On the design of natural, real-time warning systems with capability for site-specific, flash-flood forecast.** Bulletin American Meteorological Society, v. 67, n. 10, p. 1233-1239, 1986.

GONÇALVES, M. L.; OLIVEIRA, F. A.; ZANOTELLI, C. T.; OLIVEIRA, T. M. N. *et al.*(2007). **Elaboração do plano diretor dos recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio Cubatão do Norte.** Joinville, SC : UNIVILLE, 2007, 109 p.

GONÇALVES, M. L.; ZANOTELLI, C. T.; OLIVEIRA, F. A. (2006). **Diagnóstico e prognóstico das disponibilidades e demandas hídricas do rio Cubatão do Norte – Joinville – Santa Catarina.** Joinville, SC : UNIVILLE, 2006, 92p.

GRASS Development Team. **Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) Programmer's Manual.** ITC-irst, Trento, Italy. 2006a.

GRASS. **Grass: Introduction.** Disponível em: <<http://www.grass.itc.it/intro/general.php>>. Acesso em: 15/12/2007b.

GROHMANN, C.H. **Morphometric analysis in geographic information systems: applications of free software GRASS and R.** *Computers & Geosciences*, v. 30, p. 1055 – 1067, 2004.

HERRMANN, M. L. P. (org). (2005). **Atlas de Desastres Naturais do Estado de Santa Catarina.** Florianópolis : IOESC, 146p.

HUANG, B. Web-based dynamic and interactive environmental visualization. **Computers, Environment and Urban Systems.** v. 27, p. 623 – 636, 2003.

KOBIYAMA, M.; MENDONÇA, M.; MORENO, D. A.; MARCELINO, I. P. V. de O.; MARCELINO, E.V. *et. al.*; GONÇALVES, E. F.; BRAZETTI, L. L. P.; GOERL, R. F.; MOLLERI, G. S. F.; RUDORFF, F. de M. (2006). **Prevenção de Desastres Naturais – Conceitos Básicos.** Curitiba : Ed. Organic Trading, 2006, 109p.

MONTZ, B. E.; GRUNTFEST, E. **Flash flood mitigation: recommendations for research and applications.** *Environmental Hazards*, v. 4, n. 1, p. 15-22, 2002.

OLIVEIRA, F. A. (2006). **Estudo do aporte sedimentar em suspensão na Baía da Babitonga sob a ótica geomorfológica.** São Paulo – USP, Tese de Mestrado em Geografia.

OLIVEIRA, T.M.N. de; GONÇALVES, M.L. **O meio ambiente e a sua dinâmica na região de Joinville.** IN: INSTITUTO JOINVILLE 150 ANOS. Joinville 150 anos. Joinville: Letra D'Água, 2001. Apolinário Ternes (Org.). 165 p. pp.67-84.

PENNING-ROUSELL, E. **Floods.** In: PACIONE, M. **Applied geography: principles and practice.** London, UK: Routledge, 1999. 626 p.

PETTINATTI, F. (1983). **Modelamento digital e representação gráfica de superfícies.** São Paulo: USP – Escola Politécnica, Dissertação Mestrado.

SANTOS, I. **Modelagem geobiohidrológica como ferramenta no planejamento ambiental: Estudo da bacia hidrográfica do Rio Pequeno, São José dos Pinhais – PR.** Curitiba: UFPR, 2001. 92p. (Dissertação de mestrado em Ciências do Solo).

SCHULT, S. I. M.; PINHEIRO, A. (2003). “**Ocupação e controle das áreas urbanas inundáveis**”, in **Enchentes na Bacia do rio Itajaí – 20 anos de experiências**. Org. por FRANK, B, PINHEIRO, A, Blumenau - SC : Edifurb, pp 172 -190.

SILVA, R.V.; KOBAYAMA, M. Estudo comparativo de três formulações do TOPMODEL na bacia do Rio Pequeno, São José dos Pinhais, PR. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v.12, n.2, p.93-105, 2007.

SILVA, R.V. **Análise comparativa de três formulações do TOPMODEL na bacia do Rio Pequeno – PR.** Florianópolis: UFSC, 2001. 122p. (Dissertação de mestrado em Engenharia Ambiental).

SILVEIRA, W.N. **Análise histórica de inundação no município de Joinville-SC, com ênfase da Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão do Norte.** Florianópolis: UFSC, 2008. 268p. (Dissertação de mestrado em Engenharia Ambiental).

SIMÕES, J.C.X. **Caracterização Pluviométrica do Município de Joinville – SC. Joinville, 2004.** Trabalho de Graduação (Trabalho de Graduação do Curso de Engenharia Civil). Udesc, Joinville – SC.

SMITH, K. **Environmental hazards: assesing risk and reducing disaster.** Florence, USA: Routledge, 2000. 388 p.

SPRING: Tutorial de Geoprocessamento. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE / Divisão de Processamento de Imagens - DPI. Disponível em: <<http://www.dpi.inpe.br/spring/portugues/tutorial/index.html>> Acesso em: 17 nov. 2007.