

Trabalho Final de Mestrado em Engenharia Ambiental
Modalidade: Dissertação

**ESTUDO DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE VAZÕES NA
GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS**

Autor: *Maria Clara Rodrigues Xavier*
Orientadora: *Luciene Pimentel da Silva*

Centro de Tecnologia e Ciências
Faculdade de Engenharia
Departamento de Engenharia Sanitária e do Meio Ambiente

Março de 2007

ESTUDO DA DISTRIBUIÇÃO ESPACIAL DE VAZÕES NA GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS

Maria Clara Rodrigues Xavier

Trabalho Final submetido ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental da Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Aprovada por:

Prof^ª. Luciene Pimentel da Silva, Ph.D. - Presidente
PEAMB/UERJ

Prof^ª. Margareth Simões Penello Meirelles, D.Sc.
PGEC/FEN/UERJ

Prof. José Paulo Soares de Azevedo, Ph.D.
COPPE/UFRJ

Prof. Jander Duarte Campos, D.Sc.
Consultor

Universidade do Estado do Rio de Janeiro
Março de 2007

XAVIER, MARIA CLARA RODRIGUES

Estudo da Distribuição Espacial de Vazões na Gestão dos Recursos Hídricos [Rio de Janeiro] 2007.

xiv, 116 p. 29,7 cm (FEN/UERJ, Mestrado, Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental - Área de Concentração: Gestão de Recursos Hídricos, 2007.)

Dissertação - Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ

1. Gestão de Recursos Hídricos
 2. Distribuição Espacial de Vazões
 3. Modelo TOPMODEL
 4. Índice Topográfico
- I. FEN/UERJ II. Título (série)

Ao meu padrinho Arthur Lourenço,
a primeira pessoa a me explicar porque
o conhecimento é o único bem que ninguém pode nos tirar,
e aos meus filhos Ana Clara e João Ricardo,
que estão aprendendo essa lição.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Arthur (meu maior incentivador) e Alda, minha tia Alice, minha madrinha Marina e meu irmão Arthur, por terem preenchido de amor e carinho minha infância e adolescência.

Ao meu marido Jonatas, pelo amor, dedicação e exemplo de incessante interesse pelo conhecimento.

À professora Luciene Pimentel da Silva, por toda seriedade, incentivo, paciência e compreensão como orientadora e amiga.

Aos colegas Edgar Shinzato e Ezer Urpia Rosa pela paciência e generosidade na transmissão de conhecimento sobre geoprocessamento e sistemas de informações geográficas, e também nas contribuições para a elaboração deste trabalho.

Aos amigos Cassiano Crivano, Rodrigo Trindade e Sergio Warszawski, da HICON, e ao Jonatas, pelo suporte durante as horas de minha ausência do escritório, para conclusão dessa dissertação.

À Eletronuclear, que disponibilizou dados para a elaboração deste trabalho, em especial à colega Barbara Pithon.

À Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais – CPRM, pelas informações, em especial às amigas Lígia Araújo e Jane Tavares.

À Fundação Superintendência Estadual de Rios e Lagoas – SERLA, também pelas informações, em especial à amiga Mônica Falcão.

Aos professores e colegas do PEAMB, pelo convívio agradável e enriquecedor.

À UERJ, pela oportunidade de realização do curso de mestrado.

Resumo do Trabalho Final apresentado ao PEAMB/UERJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Ambiental.

Estudo da Distribuição Espacial de Vazões na Gestão dos Recursos Hídricos

Maria Clara Rodrigues Xavier

Março de 2007

Orientadora: Luciene Pimentel da Silva

Área de Concentração: Gestão de Recursos Hídricos

A *Lei das Águas* (Lei Federal 9433/97) definiu seis instrumentos de implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos, entre eles, a Outorga dos Direitos de Uso dos Recursos Hídricos, que tem como objetivo assegurar o controle dos usos e o efetivo exercício dos direitos de acesso à água. Como parte do processo de outorga é necessário estimar uma grandeza fundamental: a vazão disponível. O estabelecimento da Faixa Marginal de Proteção - FMP dos rios, pelos órgãos gestores, não tem sido citada entre os instrumentos de gestão, mas tem um papel importante como ordenador das ações antrópicas no entorno dos corpos d'água e de protetor das condições naturais da dinâmica fluvial. A definição da FMP dos cursos d'água depende da estimativa das vazões de cheia em cada local, para que possa ser preservada a calha fluvial e garantida a seção hidráulica necessária para a passagem dos volumes durante esses eventos. No entanto, a densidade de postos fluviométricos existentes é pequena, e sua distribuição espacial é irregular, deixando algumas áreas sem qualquer informação hidrológica. Essas dificuldades estão presentes em muitas bacias litorâneas brasileiras, entre elas, a região hidrográfica da baía da Ilha Grande, e em especial, a bacia do rio Mambucaba até o posto Fazenda Fortaleza (área de drenagem de 597 km²). Essa bacia foi escolhida para aplicação do modelo hidrológico TOPMODEL, que foi empregado para simulação de vazões e, também, na avaliação da influência da distribuição do índice topográfico na bacia. A disponibilidade de dados exclusivamente diários, numa bacia de médio porte, não foi um impeditivo para aplicação do modelo, ainda que seja uma fonte de incertezas, que afeta também a aplicação de qualquer outra modelagem hidrológica. Foi realizada também uma pesquisa sobre ferramentas desenvolvidas para ambientes de sistemas de informações geográficas, que facilitassem e agilisassem a aplicação de modelos matemáticos distribuídos ou semi-distribuídos, como o TOPMODEL, que utilizam modelos digitais de terreno. Verificou-se que o uso de *softwares* como o ArcGIS, desenvolvido pelo Environmental Systems Research Institute – ESRI, e de programas como o TauDEM, desenvolvido na Utah State University (USA), agilizam a derivação da curva de distribuição do índice topográfico na bacia. Os resultados obtidos indicaram uma boa perspectiva para o uso do índice topográfico em estudos de regionalização de variáveis hidrológicas, como variável explicativa das vazões, e sinalizaram para a necessidade de incrementar o monitoramento hidrológico das bacias litorâneas como condição para aprofundamento de tais estudos.

Palavras-Chave: Gestão de Recursos Hídricos, Distribuição Espacial de Vazões, Modelo TOPMODEL, Índice Topográfico.

Abstract of Final Work presented to PEAMB/UERJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Environmental Engineering.

A Study on Spatial Distribution of Outflows in Water Resource Management

Maria Clara Rodrigues Xavier

March 2007

Tutor: Luciene Pimentel da Silva

Main topic: Water Resource Management

The Brazilian Federal Law no. 9.433/97, known as the *Water Decree*, stated the six key instruments for the implementation of the National Policy on Water Resources Management. Among them, it states the Rights to the Use of Water Resources aiming at ensuring the control over uses and the effective right to access to water. To grant rights it is therefore, necessary to estimate the outflow available. Though the establishment of protected riparian areas has not been mentioned by the management boards, as a tool for water management, it plays an important role in organizing man-made activities in the areas adjacent to the water basins and protecting the natural hydrological dynamics. However, to define the protected riparian areas, it is necessary to estimate the outflow in each area, so as to preserve the channel and to ensure it is deep enough to allow the natural flow. But, as there are few river stations, scatterly distributed along the rivers, many areas are left without any hydrological information. These difficulties are present in many of the Brazilian coastal basins, such as in Ilha Grande Bay, and in particular in the Mambucaba river basin, which stretches as far as the station in Fazenda Fortaleza, covering a drainage area of 597 km². This basin was chosen for the study, applying the hydrological TOPMODEL, used to simulate the outflows and to assess the influence of the topographic index on the basin. The availability of only daily data on a small-scale basin did not hinder the model application, though there were some uncertainties that would affect the application of any other model as well. A survey was also carried out on the uses of softwares developed for environment systems of geographical data, so as to facilitate and speed the application of mathematical models such as TOPMODEL, which resort to digital models of the area. It has been observed that the use of softwares such as ArcGIS, developed by the Environmental Systems Research Institute – ESRI and programs like the TauDEM, developed by the Utah State University (USA), contribute to making it faster the distribution curve of the topographic index of the basin. The results achieved suggested that there is a good possibility of using the topographic index in the studies of regional hydrological variables and indicated that it is necessary to improve the hydrological monitoring of the coastal basins in order to further the studies in these areas.

Key words: Water Resource Management, Spatial Distribution of Outflows, TOPMODEL application, Topographic Index

SUMÁRIO

RESUMO	vi
ABSTRACT	vii
LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE QUADROS	xii
LISTA DE SIGLAS	xiii
1. INTRODUÇÃO	01
1.1 Caracterização do Problema	01
1.2 Objetivos	04
1.3 Estrutura da Dissertação	04
2. ESTIMATIVA DE VAZÕES NA GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS	06
2.1 A Política de Recursos Hídricos	06
2.2 A Vazão e a Gestão de Recursos Hídricos	14
2.2.1 Outorga	14
2.2.2 Faixa Marginal de Proteção	16
3. ESPACIALIZAÇÃO DAS VAZÕES	19
3.1 Escassez de Dados	19
3.2 Regionalização de Dados	24
3.3 Uso das Técnicas de Geoprocessamento	30
3.4 Região da Baía da Ilha Grande e a Bacia do Rio Mambucaba	34
3.4.1 Características Gerais	34
3.4.2 Clima	35
3.4.3 Comportamento Hidrológico	38
3.4.4 Solos	43
3.4.5 Cobertura Vegetal e Uso do Solo	44
4. APLICAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO TOPMODEL	46
4.1 Base Conceitual do Modelo	46
4.1.1 Conceituação Geral	46
4.1.2 Os Armazenamentos da Água no Modelo	51
4.1.3 escoamento em Canal	55
4.2 Aplicação do Modelo em Bacias Brasileiras	56
4.3 Cálculo do Índice Topográfico	64
4.3.1 Métodos de Cálculo do Índice Topográfico	64
4.3.2 Distribuição do Índice Topográfico na Bacia do Rio Mambucaba	70

4.4 Simulação de Vazões no Rio Mambucaba	82
4.4.1 Calibração do Modelo	82
4.4.2 Validação do Modelo	88
4.4.3 Influência da Distribuição do Índice Topográfico na Simulação das Vazões	89
5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	95
6. CONCLUSÕES	103
7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	107
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Macrorregiões Ambientais do Estado do Rio de Janeiro	22
Figura 3.2: Registradores de Chuva nas Bacias Litorâneas do Estado do Rio de Janeiro (Sub-bacia 59)	31
Figura 3.3: Registradores de Nível d'Água nas Bacias Litorâneas do Estado do Rio de Janeiro (Sub-bacia 59)	31
Figura 3.4: Temperaturas Média, Máxima e Mínima em Angra dos Reis (1961-1990)	36
Figura 3.5: Precipitação e Evaporação Mensal em Angra dos Reis (1961-1990)	37
Figura 3.6: Precipitação Máxima em 24 Horas de Angra dos Reis (1961-1990)	38
Figura 3.7: Disponibilidade de Dados Pluviométricos e Fluviométricos na Baía da Ilha Grande	40
Figura 3.8: Curvas-chave do rio Mambucaba em Fazenda Fortaleza	41
Figura 3.9: Vazões Médias Mensais do Rio Mambucaba em Fazenda Fortaleza (1935-2004)	42
Figura 3.10: Classes de Solos da Bacia do Rio Mambucaba até Fazenda Fortaleza	44
Figura 3.11: Cobertura Vegetal e Uso do Solo a Bacia do Rio Mambucaba até Faz. Fortaleza	45
Figura 4.1: Armazenamentos de água do solo no TOPMODEL (Beven et al, 1995)	52
Figura 4.2: Modelo Digital de Terreno TIN da Bacia do Rio Mambucaba até Faz. Fortaleza	71
Figura 4.3: Modelo Numérico de Terreno (<i>raster</i>) da Bacia do Mambucaba até Faz. Fortaleza	72
Figura 4.4: Área Contribuição Acumulada da Bacia do Mambucaba até Faz. Fortaleza	74
Figura 4.5. Mapa de Índice Topográfico da Bacia do Rio Mambucaba até Fazenda Fortaleza	76
Figura 4.6: Curvas de Distribuição dos Valores de Índice Topográfico da Bacia do Mambucaba até Fazenda Fortaleza para Diferentes Processos	77
Figura 4.7: Curvas de Distribuição Acumulada dos Valores de Índice Topográfico da Bacia do Mambucaba até Fazenda Fortaleza para Diferentes Processos	77
Figura 4.8: Áreas de Contribuição das Sub-bacias do Rio Mambucaba Estudadas	79
Figura 4.9: Distribuição dos Valores de Índice Topográfico para Diversas Áreas de Contribuição da Bacia do Rio Mambucaba	79

Figura 4.10: Distribuição Acumulada dos Valores de Índice Topográfico para Diversas Áreas de Contribuição da Bacia do Rio Mambucaba	80
Figura 4.11: Distribuição dos Valores de Índice Topográfico da Bacia do Mambucaba até Fazenda Fortaleza para Diferentes Resoluções do MNT	81
Figura 4.12: Distribuição Acumulada dos Valores de Índice Topográfico da Bacia do Mambucaba até Fazenda Fortaleza para Diferentes Resoluções do MNT	81
Figura 4.13: Curvas de Recessão para Estimativa Inicial do Parâmetro m	85
Figura 4.14: Vazões do Rio Mambucaba em Faz. Fortaleza – Calibração do modelo TOPMODEL	87
Figura 4.15: Vazões do Rio Mambucaba em Fazenda Fortaleza - Validação do Modelo TOPMODEL	89
Figura 4.16: Hidrogramas Simulados para Diversos Processos de Cálculo do Índice Topográfico	91
Figura 4.17: Hidrogramas Simulados com as Curvas de Distribuição do Índice Topográfico das Sub-bacias do Rio Mambucaba	92
Figura 4.18: Hidrogramas Simulados para Diversas Resoluções do MNT	93

LISTA DE QUADROS

Quadro 3.1: Exemplos de Variáveis na Regionalização	25
Quadro 4.1: Resultados dos Diferentes Processos de Cálculo do Índice Topográfico	77
Quadro 4.2: Resultados da Distribuição do Índice Topográfico nas Diferentes Áreas de Contribuição	79
Quadro 4.3: Resultados da Distribuição do Índice Topográfico para Diferentes Resoluções do MNT	81
Quadro 4.4: Resultados da Estimativa do Parâmetro m na Bacia do Mambucaba	85
Quadro 4.5: Faixa de valores dos parâmetros do TOPMODEL utilizada na calibração	86
Quadro 4.6: Parâmetros do TOPMODEL Calibrado para a Bacia do Mambucaba	87
Quadro 4.7: Resultados da Simulação com Curvas de Distribuição Obtidas de Diferentes Processos	90
Quadro 4.8: Resultados da Simulação com Curvas de Distribuição das Sub-bacias	92
Quadro 4.9: Resultados da Simulação para Diversas Resoluções do MNT	94

LISTA DE SIGLAS

ANA	Agência Nacional de Águas
CENA	Centro de Energia Nuclear na Agricultura
CERHI	Conselho Estadual de Recursos Hídricos
CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CPRM	Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais
DAEE	Departamento de Águas e Energia Elétrica
DEM	<i>Digital Elevation Model</i>
DNMET	Departamento Nacional de Meteorologia
DTA	<i>Digital Terrain Analysis Fortran Programs</i>
DTM	<i>Digital Terrain Model</i>
EDC	<i>Eros Data Center</i>
ESRI	Environmental Systems Research Institute
FEEMA	Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente
FMP	Faixa Marginal de Proteção
GIS	Geographic Information System
GRHIP	Grupo de Estudos de Hidrologia e Planejamento de Recursos Hídricos
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
LTHE	<i>Laboratoire d'études des Transferts en Hydrologie et en Environnement</i>
MDE	Modelo Digital de Elevação
MDT	Modelo Digital do Terreno
MNT	Modelo Numérico do Terreno
MRA	Macrorregião Ambiental
NASA	<i>National Aeronautics and Space Administration</i>
NIMA	<i>National Imagery and Mapping Agency</i>
PNRH	Plano Nacional de Recursos Hídricos
PROHIDRO	Programa Estadual de Conservação e Revitalização dos Recursos Hídricos
SEMADS	Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável
SERLA	Fundação Superintendência Estadual de Rios e Lagoas
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SIN	Sistema Interligado Nacional
SRTM	<i>Shuttle Radar Topographic Mission</i>
TauDEM	<i>Terrain Analysis Using Digital Elevation Model</i>

TIN	<i>Triangular Irregular Network</i>
TOPMODEL	<i>Topography Based Hydrological Model</i>
TOPSIMPL	<i>TOPMODEL Simplifié</i>
TWI	<i>Topographic Wetness Index</i>
UERJ	Universidade do Estado do Rio de Janeiro
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
USGS	<i>United States Geological Survey</i>
USP	Universidade de São Paulo
WMO	<i>World Meteorological Organization</i>

CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO

1.1 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

O marco inicial do processo de regulamentação do uso dos recursos hídricos no Brasil foi o *Código de Águas*, de 1934, que entre outras questões buscava definir a propriedade das águas e nascentes, assim como diretrizes para seu aproveitamento. Cerca de 63 anos depois, coube à Lei Federal 9.433, de 8 de janeiro de 1997, conhecida como *Lei das Águas*, apresentar diretrizes para implementação de uma política nacional de recursos hídricos e um novo caminho para a regulamentação do uso das águas no Brasil.

Entre esses dois marcos legais, de modo geral, a economia brasileira se desenvolveu e a maior parte da população passou a viver nas cidades, resultando em demandas concentradas de água para diversos usos. O adensamento populacional tem gerado pressões sobre os recursos hídricos não apenas de volumes disponíveis para consumo doméstico ou industrial, mas também devido à poluição provocada pelos efluentes, em sua maior parte, não tratados, e devolvidos aos cursos d'água. O consumo de energia elétrica cresceu muito, sendo a geração de energia no país realizada majoritariamente pelas usinas hidrelétricas. Se acrescentarmos a esse contexto, o aumento das áreas irrigadas em todas as regiões do país, tem-se um cenário dos conflitos atuais e potenciais que tornam indispensável o estabelecimento de uma política de recursos hídricos e de um sistema eficiente de gerenciamento desses recursos.

A *Lei das Águas* definiu seis instrumentos de implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e, entre eles, a outorga dos direitos de uso dos recursos hídricos.

O regime de outorga, licença emitida pela Federação ou pelos Estados, tem como objetivos assegurar o controle quantitativo e qualitativo dos usos da água e o efetivo exercício dos direitos de acesso à água. No tocante aos recursos hídricos superficiais, estão sujeitos à outorga pelo Poder Público: a derivação ou captação de água em um corpo hídrico para consumo, incluindo abastecimento público e insumo de processo produtivo; o lançamento em corpo hídrico de esgotos e demais resíduos líquidos ou gasosos, tratados ou não, com o fim de sua diluição, transporte ou disposição final; o aproveitamento dos potenciais hidrelétricos; e outros usos que alterem o regime fluvial, a quantidade ou a qualidade da água existente em um corpo de água.

Como parte do processo de outorga é necessário estimar uma grandeza fundamental: a vazão disponível. Além de variar muito no tempo e no espaço, a disponibilidade hídrica de

um curso d'água, para ser estimada, exige o conhecimento do comportamento hidrológico da bacia hidrográfica.

Além da estimativa da vazão disponível para o processo de outorga, amplamente discutida, outros instrumentos de gestão necessitam dessa informação. Um desses instrumentos, o sistema de informações sobre recursos hídricos, deve conter, entre outras, essa informação. O conhecimento sobre o comportamento das vazões é necessário também nos instrumentos de planejamento, no enquadramento para o uso, na outorga de água e na cobrança pelo uso do recurso.

As Faixas Marginais de Proteção - FMP de rios, lagos, lagoas e reservatórios d'água são definidas como as faixas de terra necessárias à proteção, à defesa, à conservação e operação de sistemas fluviais e lacustres. O estabelecimento da FMP, pelos órgãos gestores dos recursos hídricos, não tem sido citada entre os instrumentos de gestão, mas tem um papel importante como ordenador das ações antrópicas no entorno dos corpos d'água e de protetor das condições naturais da dinâmica fluvial. O desrespeito à FMP em áreas rurais ou urbanas tem criado problemas de erosão, assoreamento, inundações e poluição, por isso o estabelecimento da FMP foi incluído, nessa dissertação, como uma ação importante da gestão dos recursos hídricos.

A definição da FMP dos cursos d'água depende da estimativa das vazões de cheia em cada local, para que possa ser preservada a calha fluvial e garantida a seção hidráulica necessária para a passagem dos volumes durante esses eventos.

Por sua vez, o regime fluvial dos cursos d'água brasileiros é fortemente marcado pela sazonalidade e variabilidade inter-anual, de modo que sua caracterização requer dados históricos do maior período de tempo possível no local de interesse.

As redes de monitoramento fluviométrico das bacias hidrográficas brasileiras, no entanto, estão muito aquém da condição desejável. A densidade de postos fluviométricos existentes é pequena, e sua distribuição espacial é irregular, deixando algumas áreas sem qualquer informação hidrológica.

Os postos de monitoramento fluviométrico mais antigos datam da década de 1920, de modo que as séries históricas nesses locais têm cerca de 80 anos de extensão. No entanto, esses casos estão restritos a rios de médio e grande porte, com os postos controlando grandes áreas de drenagem. Frequentemente, essas estações antigas foram instaladas com o intuito de estudar o potencial hidrelétrico de alguns cursos d'água, localizando-se apenas nas bacias de maior interesse para geração hidrelétrica, com áreas de drenagem superiores a 500 km².

Como a definição das dimensões máximas de uma pequena bacia sempre apresenta algum grau de subjetividade (Goldenfum, 2003), adotou-se na presente dissertação o conceito de que as pequenas bacias hidrográficas seriam aquelas com áreas de drenagem entre 10 e 100 km², que em sua maior parte não possuem postos de monitoramento.

Mesmo em bacias de médio porte, cujas áreas de contribuição estão entre 100 e 1.000 km², com frequência os postos estão localizados nos trechos mais baixos do curso d'água principal, mantendo o desconhecimento sobre o regime fluvial próximo às cabeceiras e nos afluentes menores.

Algumas vezes, quando existe monitoramento fluviométrico em pequenas bacias, ele é recente e as observações disponíveis ainda não permitem a caracterização segura do comportamento das vazões, não representando adequadamente suas variações anuais e sazonais.

Outro aspecto que interfere com a disponibilidade hídrica e os picos de vazão durante as cheias é o fato do comportamento hidrológico ser muito afetado pelas ações antrópicas na bacia e pelos usos da água na área de contribuição a montante. A redução da cobertura vegetal, devido ao desmatamento, e o aumento das áreas urbanas impermeabilizadas tende a diminuir a capacidade natural de regularização de vazões das bacias, afetando as vazões mínimas e máximas, principalmente nas menores áreas de drenagem.

Se a vazão estimada durante o processo de licenciamento for inferior à vazão disponível real, a outorga de uso do recurso hídrico pode ser negada, resultando numa restrição desnecessária ao uso da água, eventualmente com prejuízos econômicos e sociais. Como exemplo, a negativa equivocada de outorga de uso da água pode deslocar uma indústria, em fase de planejamento, do local mais adequado para outro, com condições menos favoráveis.

Por outro lado, se a vazão estimada durante o processo de licenciamento for superior à vazão disponível real, a outorga de uso do recurso hídrico pode ser emitida e ocasionar um esgotamento dos recursos hídricos ou da capacidade de autodepuração do corpo d'água, afetando os diversos usuários.

O não estabelecimento da faixa marginal de proteção dos cursos d'água, ou seu desrespeito, tem criado problemas, em áreas rurais ou urbanas, de erosão, assoreamento e inundações.

Essas dificuldades, para estimativa das vazões, estão presentes em muitas bacias hidrográficas litorâneas brasileiras, incluindo as do Estado do Rio de Janeiro e, em especial, a região hidrográfica da baía da Ilha Grande. Em contraposição às incertezas, o aumento da ocupação do solo e o incremento das atividades econômicas nessa região tem exigido

respostas cada vez mais precisas quanto às vazões máximas outorgáveis nos cursos d'água. As questões expostas levaram à escolha da região hidrográfica da baía da Ilha Grande como área do estudo de caso da presente dissertação, assim como a bacia do rio Mambucaba para aplicação do modelo hidrológico TOPMODEL, empregado para simulação de vazões e na avaliação da influência da distribuição do índice topográfico no comportamento hidrológico da bacia hidrográfica.

O índice topográfico incorpora duas variáveis significativas do comportamento hidrológico: a área de contribuição e a declividade do terreno em um determinado ponto da bacia. No TOPMODEL, o índice topográfico representa a tendência de um determinado ponto da bacia desenvolver condições saturadas, caracterizando também a similaridade hidrológica, pois na conceituação do modelo todos os pontos com o mesmo valor de índice topográfico apresentam o mesmo comportamento hidrológico. O capítulo 5 apresenta melhor essa questão.

1.2 OBJETIVOS

Os principais objetivos desta dissertação são:

- investigar se modelos matemáticos de simulação hidrológica que usam dados de precipitação e modelos digitais de terreno podem ser aplicados adequadamente a bacias hidrográficas litorâneas;
- pesquisar sobre ferramentas recentemente disponibilizadas, desenvolvidas para ambientes de sistemas de informações geográficas, que facilitem e agilizem a aplicação de modelos matemáticos distribuídos ou semi-distribuídos, como o TOPMODEL;
- investigar a possibilidade da utilização do índice topográfico, que relaciona a área de contribuição e a declividade do terreno, como uma variável explicativa de estudos de regionalização de vazões;
- identificar outras informações disponíveis que, através do uso de sistemas de informações geográficas (SIG), também possam ser úteis no conhecimento sobre a distribuição espacial das vazões.

1.3 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O presente estudo foi desenvolvido em três etapas. Na primeira, foi realizada uma extensa pesquisa bibliográfica sobre estudos: de regionalização de vazões; de aplicação de modelos hidrológicos distribuídos ou semi-distribuídos, em especial o modelo TOPMODEL;

de processos de cálculo do índice topográfico; e do uso das ferramentas de sistema de informações geográficas em hidrologia.

Numa segunda etapa, foram compiladas as informações disponíveis sobre as bacias litorâneas do estado do Rio de Janeiro, em especial sobre a região da baía da Ilha Grande, abrangendo: documentos sobre o tema; dados hidrológicos e climatológicos; dados topográficos digitais; mapas de solos e cobertura vegetal e uso do solo.

A terceira etapa foi, então, uma aplicação do modelo de simulação hidrológica TOPMODEL à bacia do rio Mambucaba, afluente à baía da Ilha Grande. Essa aplicação envolveu: a utilização de diversos processos de cálculo do índice topográfico e determinação da função de sua distribuição na bacia; a calibração e validação do modelo; e a investigação da influência do índice topográfico na simulação de vazões.

A dissertação está estruturada em 6 capítulos. Após a introdução apresentada na presente seção, o capítulo 2 apresenta um resumo sobre: a política de recursos hídricos no Brasil e no Estado do Rio de Janeiro; o processo de outorga de uso da água e de estabelecimento da faixa marginal de proteção dos cursos d'água no Estado do Rio de Janeiro; as variáveis hidrológicas necessárias para o desenvolvimento desses instrumentos na gestão dos recursos hídricos.

O capítulo 3 contém: informações e comentários sobre a problemática da escassez de dados no Brasil e, em especial, nas bacias litorâneas fluminenses; uma revisão bibliográfica sobre estudos de regionalização de vazões e os recursos das técnicas de geoprocessamento, em especial na modelagem hidrológica; e uma caracterização da bacia hidrográfica da baía da Ilha Grande, em especial da bacia do rio Mambucaba.

No capítulo 4 são apresentados: a base conceitual do TOPMODEL; algumas experiências de sua aplicação no Brasil; os diversos processos usados na determinação da distribuição do índice topográfico na bacia; os resultados da calibração e validação do modelo; e a influência do índice topográfico na simulação das vazões.

O capítulo 5 apresenta uma discussão sobre os resultados obtidos na aplicação do modelo TOPMODEL à bacia do rio Mambucaba e sua contribuição para o estudo da distribuição espacial de vazões na gestão dos recursos hídricos.

Por fim, o capítulo 6 apresenta as conclusões finais e o capítulo 7 indica sugestões para trabalhos futuros seguido das referências bibliográficas.

CAPÍTULO 2. ESTIMATIVA DE VAZÕES NA GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS

2.1 A POLÍTICA DE RECURSOS HÍDRICOS

A estimativa de vazões nos cursos d'água é uma informação necessária para a gestão dos recursos hídricos, sendo demandada de forma recorrente na aplicação da política nacional de recursos hídricos, através de seus diversos instrumentos de implementação.

Além do Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos, que é um desses instrumentos e deve conter também essas informações, a necessidade do conhecimento sobre o comportamento das vazões também está presente nos instrumentos de planejamento, no enquadramento para o uso, na outorga de água e na cobrança pelo uso do recurso.

O presente capítulo pretende evidenciar essa questão, abordando o estágio atual da política de recursos hídricos a nível federal e no estado do Rio de Janeiro, e situando algumas peculiaridades sobre a região da baía da Ilha Grande, onde foi realizado o estudo de caso dessa dissertação.

O Decreto Federal nº 24.643, de 10 de julho de 1934, denominado *Código de Águas*, é considerado o marco inicial do processo de regulamentação do uso dos recursos hídricos no Brasil. Posteriormente, esse decreto foi parcialmente revisto pelo Decreto Federal nº 3.763, de 25 de outubro de 1941, que tratava especialmente de artigos relacionados com as águas e a geração e distribuição da energia elétrica.

A Lei Federal 9.433, de 8 de janeiro de 1997, também conhecida como *Lei das Águas*, apresentou, cerca de 63 anos depois do *Código de Águas*, diretrizes para implementação de uma política nacional de recursos hídricos e um novo caminho para a regulamentação do uso das águas no Brasil.

Entre esses dois marcos legais, de modo geral, a economia brasileira se desenvolveu e a maior parte da população passou a viver nas cidades, resultando em demandas concentradas de água para diversos usos. Conforme o Documento Básico de Referência – DBR (ANA, novembro de 2002), elaborado para subsidiar o Plano Nacional de Recursos Hídricos, o Brasil tem 81,2% de sua população situada nos centros urbanos. Na Região Hidrográfica do Atlântico Sudeste, na qual estão inseridas as bacias hidrográficas litorâneas do Estado do Rio de Janeiro, essa taxa é ainda maior, com média de 89,6%.

O adensamento populacional tem gerado pressões sobre os recursos hídricos não apenas de volumes disponíveis para consumo doméstico ou industrial, mas também devido à poluição provocada pelos efluentes não tratados e devolvidos aos cursos d'água. Apesar da alta taxa de urbanização, 22,2% dos domicílios brasileiros ainda não contam com rede de distribuição de água. A Pesquisa Nacional de Saneamento (PNSB/IBGE, 2000) identificou 7 capitais brasileiras que apresentam racionamento na distribuição de água devido à seca e estiagem ou problemas de disponibilidade hídrica, entre elas, Brasília e São Paulo. Quanto ao saneamento básico, cerca de 37,8% dos domicílios têm solução inadequada de esgotamento, mesmo considerando a fossa séptica como satisfatória. Do volume de esgoto doméstico lançado em rede coletora, aproximadamente 64,7% não recebem qualquer tipo de tratamento antes de desaguar no seu destino final. Essa situação conduz ao comprometimento da disponibilidade hídrica, devido à degradação da qualidade de água.

Além disso, o adensamento tem exercido enorme pressão sobre os cursos d'água que atravessam áreas urbanas, promovendo a completa remoção da mata ciliar, a ocupação do leito maior e o confinamento do escoamento a canais com capacidade hidráulica insuficiente, o que resulta em inundações urbanas cada vez mais frequentes.

O consumo de energia elétrica cresceu muito e a geração no Brasil é realizada majoritariamente pelas usinas hidrelétricas. Segundo o Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS (Arteiro, 2006), cerca de 98% do mercado nacional de energia elétrica é atendido pelo Sistema Interligado Nacional – SIN. Da capacidade total instalada que compõe o SIN, equivalente a uma potência de 80.930MW, as usinas hidrelétricas correspondem a 85% desse total, participando com 68.440MW de potência instalada. Essa condição evidencia a importância dos recursos hídricos para a matriz energética brasileira.

Se acrescentarmos a esse contexto, o aumento das áreas irrigadas em todas as regiões do país, tem-se um bom cenário dos conflitos atuais e potenciais relacionados com o uso dos recursos hídricos. Segundo o Caderno sobre Disponibilidade e Demandas de Recursos Hídricos no Brasil (ANA, maio de 2005), a maior demanda por água no país é exercida pela agricultura irrigada. A vazão de retirada para usos consuntivos no país, no ano de referência de 2000, era 1.592 m³/s. Cerca de 53% deste total (841 m³/s) são efetivamente consumidos e 751 m³/s retornam à bacia. Aproximadamente 46% das vazões de retirada no país são destinadas à irrigação, enquanto para o segundo colocado, o abastecimento urbano, são destinadas apenas 26% das retiradas. Em relação às vazões efetivamente consumidas, 69% são destinadas à irrigação, sendo seguido pelo abastecimento urbano com 11% do consumo.

Esses fatos tornaram inadiável o estabelecimento de uma política de recursos hídricos e de um sistema eficiente de gerenciamento desses recursos, levando à necessidade de uma revisão na legislação federal sobre o assunto, consolidada na Lei nº 9.433/97, que instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos e criou também o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, com base nos seguintes fundamentos:

- a) a água é um bem de domínio público;
- b) a água é um recurso natural limitado e dotado de valor econômico;
- c) em situações de escassez, o uso prioritário dos recursos hídricos é o consumo humano e a dessedentação de animais;
- d) a gestão dos recursos hídricos deve sempre proporcionar o uso múltiplo das águas;
- e) a bacia hidrográfica é a unidade territorial para implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e atuação do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos;
- f) a gestão dos recursos hídricos deve ser descentralizada e contar com a participação do Poder Público, dos usuários e das comunidades.

A partir de seus princípios, foram definidos como objetivos da Política Nacional de Recursos Hídricos: assegurar à atual e às futuras gerações a necessária disponibilidade de água, em padrões de qualidade adequados aos respectivos usos; a utilização racional e integrada dos recursos hídricos, incluindo o transporte aquaviário, com vistas ao desenvolvimento sustentável; e a prevenção e a defesa contra eventos hidrológicos críticos de origem natural, ou decorrentes do uso inadequado dos recursos naturais.

No Rio de Janeiro, foi a Lei nº 3.239, de 02 de agosto de 1999, que instituiu a política estadual de Recursos Hídricos e criou o sistema estadual de gerenciamento de recursos hídricos.

Tanto no âmbito federal quanto no Rio de Janeiro, foram definidos como instrumentos de implantação da política de recursos hídricos para atingir esses objetivos:

- os Planos de Recursos Hídricos (nacional, estaduais e de bacias hidrográficas);
- o enquadramento dos corpos de água em classes, segundo os usos preponderantes da água;
- a outorga dos direitos de uso de recursos hídricos;
- a cobrança pelo uso de recursos hídricos;
- o Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos.

Na legislação federal aparece, ainda, a compensação a Municípios, e para a política estadual, foi definido como mais um instrumento o Programa Estadual de Conservação e Revitalização de Recursos Hídricos (PROHIDRO).

O **Enquadramento dos Corpos d'Água em Classes**, segundo os usos preponderantes da água, visa assegurar às águas qualidade compatível com os usos mais exigentes a que forem destinadas e diminuir os custos de combate à poluição das águas, mediante ações preventivas permanentes. O enquadramento dos corpos d'água deve ser visto como um instrumento de planejamento ambiental, pois deve estar baseado não necessariamente no seu estado atual, mas nos níveis de qualidade que deveriam possuir ou ser mantidos para atender às necessidades estabelecidas pela comunidade, levando em conta as suas prioridades de uso.

No Estado do Rio de Janeiro, já sofreram enquadramento apenas os rios de domínio federal da bacia do rio Paraíba do Sul. Os principais corpos d'água de domínio estadual haviam sido enquadrados em classes pela FEEMA, na década de 70, porém, antes da Resolução CONAMA 20/86, revogada recentemente pela Resolução CONAMA 357/05. Os cursos d'água da bacia hidrográfica da Baía da Ilha Grande ainda não foram objeto de enquadramento em classes de uso.

Os **Planos de Recursos Hídricos** são planos diretores de longo prazo, que visam orientar a implementação da Política de Recursos Hídricos e o gerenciamento dos recursos hídricos. Seu horizonte de planejamento deve ser compatível com o período de implantação de seus programas e projetos, devendo ser elaborados por bacia hidrográfica, por Estado e para o país como um todo. Os Planos devem apresentar, entre outros itens, um diagnóstico da situação atual dos recursos hídricos e as prioridades para outorga de direitos de uso de recursos hídricos.

O Plano Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) já foi elaborado e aprovado pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos, em 3 de março de 2006. O Plano de Recursos Hídricos do Estado do Rio de Janeiro encontra-se ainda em elaboração. Para a bacia hidrográfica da Baía da Ilha Grande não existe nenhum plano de recursos hídricos específico.

O regime de **Outorga de Direitos de Uso dos Recursos Hídricos** tem como objetivos assegurar o controle quantitativo e qualitativo dos usos da água e o efetivo exercício dos direitos de acesso à água. A outorga não implica a alienação parcial das águas, que são inalienáveis, mas o simples direito de seu uso, estando sujeitos à outorga pelo Poder Público os direitos dos seguintes usos de recursos hídricos:

- a) derivação ou captação de parcela da água existente em um corpo de água para consumo final, inclusive abastecimento público, ou insumo de processo produtivo;

- b) extração de água de aquífero subterrâneo para consumo final ou insumo de processo produtivo;
- c) lançamento em corpo de água de esgotos e demais resíduos líquidos ou gasosos, tratados ou não, com o fim de sua diluição, transporte ou disposição final;
- d) aproveitamento dos potenciais hidrelétricos;
- e) outros usos que alterem o regime, a quantidade ou a qualidade da água existente em um corpo de água.

Cabe ressaltar que o uso da água como insumo do processo produtivo incluiu os diversos consumos industriais. Independentemente de outorga pelo Poder Público, o atendimento das necessidades de pequenos núcleos populacionais, distribuídos no meio rural, e as derivações, captações, lançamentos e acumulações de volumes de água considerados insignificantes.

Na outorga, deverão ser preservados os usos múltiplos dos recursos hídricos, estando condicionada às prioridades estabelecidas nos Planos de Recursos Hídricos e respeitando a classe em que o corpo de água estiver enquadrado.

A outorga deverá ser efetivada por ato da autoridade competente do Poder Executivo Federal ou dos Estados. A bacia hidrográfica da baía da Ilha Grande está localizada majoritariamente no estado do Rio de Janeiro, mas tem pequenas áreas no estado de São Paulo. Segundo os critérios estabelecidos, os rios Ariró, Bracuí e Mambucaba dessa bacia são de domínio federal. Portanto, os órgãos competentes para concederem a outorga de uso dos recursos hídricos na baía da Ilha Grande são a Fundação Superintendência Estadual de Rios e Lagoas - SERLA e o Departamento de Águas e Energia Elétrica - DAEE, órgãos estaduais gestores dos recursos hídricos nos estados do Rio de Janeiro e São Paulo, respectivamente, e a Agência Nacional de Águas – ANA.

A Cobrança pelo Uso dos Recursos Hídricos deve abranger todos os usos de recursos hídricos sujeitos à outorga, tendo a cobrança os seguintes objetivos:

- reconhecer a água como bem econômico e dar ao usuário uma indicação de seu real valor;
- incentivar a racionalização do uso da água;
- obter recursos financeiros para o financiamento dos programas e intervenções contemplados nos planos de recursos hídricos.

Os valores arrecadados com a cobrança pelo uso dos recursos hídricos deverão ser aplicados prioritariamente na bacia hidrográfica em que foram gerados.

A cobrança pelo uso dos recursos hídricos já está sendo realizada nos rios de domínio federal da bacia do rio Paraíba do Sul, incluindo aqueles localizados em território fluminense.

No Rio de Janeiro, a Lei nº 4247, de 16 de dezembro de 2003, dispôs sobre a cobrança dos recursos hídricos de domínio estadual. O Art. 8º define que na fixação dos valores

cobrados devem ser observados, entre outros, os seguintes aspectos: a disponibilidade hídrica local; o grau de regularização assegurado por obras hidráulicas; a sazonalidade; e a localização do usuário na bacia. A cobrança pelo uso dos recursos hídricos nos rios de domínio do estado nos rios de domínio do estado do Rio de Janeiro já foi iniciada.

Com relação à Compensação a Municípios, a Lei 9.433, em seu Art. 24º, determinava que poderiam receber compensação financeira ou de outro tipo os Municípios que tivessem áreas inundadas por reservatórios, ou sujeitas a restrições de uso do solo com finalidade de proteção de recursos hídricos. Com isso, buscava-se ressarcir suas comunidades da privação das rendas futuras que os terrenos inundados, ou sujeitos a restrições de uso do solo, poderiam gerar.

No entanto, apesar de apresentado como um dos instrumentos da Lei, o Artigo 24º foi vetado pelo Presidente da República, tendo sido apresentadas as seguintes razões:

O estabelecimento de mecanismo compensatório aos Municípios não encontra apoio no texto da Carta Magna como é o caso da compensação financeira prevista no § 1º, do art. 20º, da Constituição que, abrange exclusivamente a exploração de recursos hídricos para fins de geração de energia elétrica.

A par acarretar despesas adicionais para a União, o disposto no § 2º terá como consequência a impossibilidade de utilização da receita decorrente da cobrança pelo uso de recursos hídricos para financiar eventuais compensações, Como decorrência, a União deverá deslocar recursos escassos de fontes existentes para o pagamento de nova despesa.

Além disso, a compensação financeira poderia ser devida, nos casos em que o poder concedente fosse diverso do federal, como por exemplo, decisões de construção de reservatórios por parte do Estado ou Municípios que trouxesse impacto sobre outro Município, com incidência da compensação sobre os cofres da União.

Com isso, a geração de energia elétrica é o único uso da água que pratica a compensação financeira a Municípios que tenham áreas inundadas por reservatórios.

A Usina Nuclear de Angra, de geração de energia elétrica, está localizada na baía da Ilha Grande, porém, não existem reservatórios com essa finalidade na região e, portanto, esse instrumento da política de recursos hídricos não se aplica.

O Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos foi proposto como um sistema de coleta, tratamento, armazenamento e recuperação de informações sobre recursos hídricos e fatores intervenientes em sua gestão. Os dados gerados pelos diversos órgãos integrantes do Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos deverão ser incorporados ao Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos.

Os princípios básicos para o funcionamento do Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos são:

- descentralização da obtenção e produção de dados e informações;
- coordenação unificada do sistema;
- acesso aos dados e informações garantido a toda a sociedade.

Com base em seus princípios, foram definidos como objetivos do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos:

- reunir, dar consistência e divulgar os dados e informações sobre a situação qualitativa e quantitativa dos recursos hídricos no Brasil;
- atualizar permanentemente as informações sobre disponibilidade e demanda de recursos hídricos em todo o território nacional;
- fornecer subsídios para a elaboração dos Planos de Recursos Hídricos.

A Agência Nacional de Águas - ANA tem exercido um importante papel centralizador das informações e, também, de facilitador do acesso às informações por técnicos e a sociedade em geral, principalmente, através da disponibilização de relatórios e de consulta a bancos de dados via internet.

A SERLA possui uma rede hidrometeorológica com 45 estações pluviométricas e fluviométricas, das quais 22 têm equipamento de telemetria. As fichas descritivas dessas estações estão disponíveis no *site* da SERLA, porém os dados observados não estão acessíveis.

Além disso, as estações dessa rede localizam-se exclusivamente na área das bacias hidrográficas contíguas drenantes para a Baía da Guanabara, para os sistemas lagunares de Jacarepaguá e Maricá e para as áreas costeiras adjacentes, limitando-se a oeste com a bacia hidrográfica drenante para a Baía de Sepetiba e a leste com a bacia hidrográfica da região dos Lagos. Portanto, a rede hidrometeorológica do Estado do Rio de Janeiro não tem nenhuma estação sequer na região da baía da Ilha Grande.

Aspectos da Implementação da Política de Recursos Hídricos

Foram definidas como competências dos Poderes Executivos Federal e Estaduais na implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos:

- tomar as providências necessárias à implementação e ao funcionamento dos Sistemas de Gerenciamento de Recursos Hídricos, nacional e estaduais;

- outorgar os direitos de uso de recursos hídricos, e regulamentar e fiscalizar os usos, na sua esfera de competência;
- implantar e gerir os Sistemas de Informações sobre Recursos Hídricos, nos âmbitos nacional e estadual;
- promover a integração da gestão de recursos hídricos com a gestão ambiental.

Cabe aos Poderes Executivos Estaduais, ainda, realizar o controle técnico das obras de oferta hídrica. Na implementação da Política de Recursos Hídricos, caberá às Prefeituras Municipais promover a integração das políticas locais de saneamento básico, de uso, ocupação e conservação do solo e de meio ambiente, com as políticas federal e estaduais de recursos hídricos.

Deverão compor o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos as seguintes entidades:

- o Conselho Nacional de Recursos Hídricos - CNRH;
- os Conselhos de Recursos Hídricos dos Estados e do Distrito Federal;
- os Comitês de Bacia Hidrográfica;
- os órgãos dos poderes públicos federal, estaduais e municipais cujas competências se relacionem com a gestão de recursos hídricos;
- as Agências de Água.

O CNRH e o Conselho de Recursos Hídricos do Estado do Rio de Janeiro - CERHI foram instalados e encontram-se atuantes.

Segundo a Lei 9.433, compete aos Comitês de Bacia Hidrográfica, no âmbito de sua área de atuação:

- promover o debate das questões relacionadas a recursos hídricos e articular a atuação das entidades intervenientes;
- arbitrar, em primeira instância administrativa, os conflitos relacionados aos recursos hídricos;
- aprovar o Plano de Recursos Hídricos da bacia;
- acompanhar a execução do Plano de Recursos Hídricos da bacia e sugerir as providências necessárias ao cumprimento de suas metas;
- propor ao Conselho Nacional e aos Conselhos Estaduais de Recursos Hídricos as acumulações, derivações, captações e lançamentos de pouca expressão, para efeito de isenção da obrigatoriedade de outorga de direitos de uso de recursos hídricos, de acordo com os domínios destes;

- estabelecer os mecanismos de cobrança pelo uso de recursos hídricos e sugerir os valores a serem cobrados;
- estabelecer critérios e promover o rateio de custo das obras de uso múltiplo, de interesse comum ou coletivo.

No âmbito do Sistema Estadual de Gerenciamento de Recursos Hídricos, existem os seguintes comitês de bacias hidrográficas:

- a) Comitê das Bacias Hidrográficas dos Rios Guandu, da Guarda e Guandu-Mirim – Comitê Guandu, instituído pelo Decreto Estadual 31.178, de 03 de abril de 2002;
- b) Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Macaé, que compreende também as bacias dos rios Jurubatiba e Imboassica e da lagoa de Imboassica, instituído pelo Decreto Estadual 34.243 de 04 de novembro de 2003;
- c) Comitê das Bacias Hidrográficas das Lagoas de Araruama, Saquarema e dos Rios São João, Una e Ostras, instituído pelo Decreto Estadual 36.733 de 08 de dezembro de 2004;
- d) Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Piabanha e das Sub-bacias Hidrográficas dos Rios Paquequer e Preto, instituído pelo Decreto Estadual 38.235, de 14 de setembro de 2005;
- e) Comitê da Região Hidrográfica da Baía de Guanabara e dos Sistemas Lagunares de Maricá e Jacarepaguá, instituído pelo Decreto Estadual 38.260 de 16 de setembro de 2005.

Na região da baía da Ilha Grande, ainda não foi instalado nenhum comitê de bacia hidrográfica.

2.2 A VAZÃO E A GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS

2.2.1 Outorga

Para qualquer interferência que se pretenda efetuar em um manancial, que possa alterar a quantidade ou a qualidade das águas, mesmo que não haja volume consumido, é necessário obter autorização do Poder Público. Essa exigência se estende, portanto, a abastecimento doméstico e industrial, lançamento de efluentes urbanos ou industriais, irrigação, geração de energia, estruturas de turismo e lazer, canalização de rios, dragagens e limpeza de margens.

A Outorga de Direito de Uso de Recursos Hídricos é um ato administrativo, publicado no Diário Oficial do Estado do Rio de Janeiro, onde o outorgado é identificado e ficam estabelecidas as características técnicas e as condicionantes legais do uso das águas que o outorgado está sendo autorizado a fazer.

Conforme a Lei Estadual nº 3.239/99, estão sujeitos à outorga os mesmos usos dos recursos hídricos estabelecidos pela Lei Federal nº 9.433, citados anteriormente. Da mesma forma, os usos que independem de outorga pelo poder público são os mesmos nas duas leis.

Para fins industriais, a Lei 3.239/99 estabelece, ainda, que a outorga para fins industriais somente é concedida se a captação em cursos de água se fizer a jusante do ponto de lançamento dos efluentes líquidos da própria instalação.

A Portaria SERLA nº 273, de 11 de dezembro de 2000, estabelece os procedimentos técnicos e administrativos para a emissão de outorga de direito de uso de recursos hídricos de domínio do Estado do Rio de Janeiro.

Em seu Art. 7º, a Portaria define que qualquer pessoa física ou jurídica poderá efetuar consulta prévia quanto à disponibilidade hídrica de um corpo hídrico em uma determinada seção. Essa consulta prévia se destina, exclusivamente, à reserva da vazão passível de outorga, possibilitando ao requerente o planejamento de empreendimentos que necessitem desses recursos.

A reserva da vazão requerida, existindo disponibilidade hídrica, poderá ser autorizada pelo Presidente da SERLA, pelo prazo máximo de 6 meses, mediante ato a ser publicado no Diário Oficial do Estado do Rio de Janeiro.

No caso de geração de energia hidrelétrica, a declaração de reserva de disponibilidade hídrica pela SERLA deverá ser obtida previamente pela ANEEL, para fins de licitação de concessão ou autorização de uso de potencial de energia hidráulica em corpo d'água de domínio estadual, conforme parágrafo 1º e 2º do Art. 7º, da Lei 9984 de 17 de julho de 2000. A análise técnica a ser efetivada pela SERLA, para emitir a declaração de reserva da disponibilidade hídrica, obedecerá aos mesmos requisitos exigidos para o pedido de outorga.

Conforme o Art. 9º da Portaria 273, a SERLA, na análise do pedido de outorga, levará em consideração os seguintes critérios para as águas superficiais:

- os aspectos quantitativos da água do corpo hídrico, nos pontos indicados para captação;
- a adoção dos dados fornecidos no relatório Estudo das Vazões Mínimas dos Principais Cursos de Água do Estado do Rio de Janeiro, elaborado pela FEEMA em 1978, para fins de estimativa da vazão mínima dos cursos de água, salvo se existirem, para a bacia hidrográfica sob exame, estudos mais atualizados;
- considerar como vazão máxima utilizável: 80% da vazão $Q_{7\text{dias},10\text{anos}}$ do curso d'água junto à seção de interesse, para captação com fins de abastecimento humano; e 50% da vazão

$Q_{7\text{dias},10\text{anos}}$ do curso d'água junto à seção de interesse para os demais casos de uso consuntivo.

O requerente/usuário para obtenção da outorga de uso de recursos hídricos deverá apresentar, entre outros, os seguintes documentos:

- planta, na escala 1:50.000, com localização geográfica dos pontos característicos objeto do pedido de outorga, incluindo nome do corpo hídrico e da bacia hidrográfica;
- estudo hidrológico de regularização do regime hídrico, no caso de modificação do regime fluvial, construção de barramentos e/ou desvio de rios, de acordo com especificações técnicas da SERLA.

2.2.2 Faixa Marginal de Proteção

As Faixas Marginais de Proteção - FMP de rios, lagos, lagoas e reservatórios d'água são faixas de terra necessárias à proteção, à defesa, à conservação e operação de sistemas fluviais e lacustres, determinadas em projeção horizontal e considerados os níveis máximos de água (NMA), de acordo com as determinações dos órgãos Federais e Estaduais competentes (www.serla.rj.gov.br).

O estabelecimento da FMP não tem sido citado entre os instrumentos de gestão dos recursos hídricos, porém, a sua definição mostra claramente seu papel de ordenador das ações antrópicas no entorno dos corpos d'água e de protetor das condições naturais da dinâmica fluvial. O desrespeito à FMP, em áreas rurais ou urbanas, tem criado problemas de erosão, assoreamento, inundações e poluição, que afetam direta ou indiretamente a disponibilidade hídrica, de forma quantitativa e qualitativa. Por essa razão, o estabelecimento da FMP foi incluído, nessa dissertação, como uma ação importante da gestão dos recursos hídricos.

Os aspectos legais para estabelecimento da FMP iniciaram com a Lei Estadual nº 1.130, de 12 de fevereiro de 1987, que em seu Art. 3º define as áreas de proteção de rios, ilhas fluviais e lacustres, lagos, lagoas e reservatórios como de Interesse Especial do Estado.

O Art. 9º dessa lei definiu ainda que essas áreas de proteção e interesse especial compreendem as faixas marginais dos rios, lagos, lagoas, reservatórios d'água, as ilhas fluviais e lacustres, estabelecidas de acordo com critérios técnicos e regulamentares de ordem hidrográfica, geológica, geotécnica e ecológica. Com relação aos rios, a largura das faixas correspondentes às áreas de interesse especial será demarcada pela Superintendência Estadual

de Rios e Lagoas - SERLA e pela Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente - FEEMA, a partir do eixo do curso d'água.

Posteriormente, a Lei nº 3239, de 02 de agosto de 1999, que criou o sistema estadual de gerenciamento de recursos hídricos diz, em seu Art. 33º, que as margens e leitos de rio, lagoas e lagunas serão protegidos pelo projeto de Faixa Marginal de Proteção – FMP e pela determinação do uso e ocupação permitidos para a FMP.

Conforme o Art. 40º dessa lei, na implantação da Política Estadual de Recursos Hídricos, cabe ao Poder Executivo, na sua esfera de ação e por meio do organismo competente, entre outras providências: exercer o poder de polícia relativo à utilização dos recursos hídricos e das Faixas Marginais de Proteção (FMP's) dos cursos d'água; e manter sistema de alerta e assistência à população, para as situações de emergência causadas por eventos hidrológicos críticos.

A Portaria nº 324, de 28 de agosto de 2003, definiu a base legal para estabelecimento da largura *mínima* da FMP. Foram estabelecidas, ao longo de qualquer curso d'água, as larguras *mínimas* em faixa marginal desde o seu nível mais alto, da seguinte forma:

- de 30 (trinta) metros para os cursos d'água de menos de 10 (dez) metros de largura;
- de 50 (cinquenta) metros para os cursos d'água que tenham de 10 (dez) a 50 (cinquenta) metros de largura;
- de 100 (cem) metros para os cursos d'água que tenham de 50 (cinquenta) a 200 (duzentos) metros de largura;
- de 200 (duzentos) metros para os cursos d'água que tenham de 200 (duzentos) a 600 (seiscentos) metros de largura;
- de 500 (quinhentos) metros para os cursos d'água que tenham largura superior a 600 (seiscentos) metros;
- ao redor das lagoas, lagos ou reservatórios d'água naturais ou artificiais, utilizar a largura mínima existente 30 (trinta) metros do nível mais alto;
- nas nascentes, ainda que intermitentes e nos chamados “olhos d'água”, qualquer que seja a sua situação topográfica, num raio mínimo de 50 (cinquenta) metros de largura;
- nas restingas, como fixadoras de dunas ou estabilizadoras de mangues, e nas bordas de tabuleiros ou chapadas, a partir da linha de ruptura do relevo, em faixa nunca inferior a 100 (cem) metros em projeções horizontais.

Conforme as determinações da SERLA, a Faixa Marginal de Proteção – FMP tem as seguintes características:

- área de preservação permanente, em acordo com a Constituição Estadual, Art. 268º;
- toda e qualquer vegetação natural presente no entorno de corpos lacustres e ao longo de cursos d'água, passa, então, a ter caráter de preservação permanente;
- área *non aedificandi*;
- área destinada à preservação, conservação ou recuperação da mata ciliar;
- as larguras das FMP's determinadas em lei são larguras mínimas, que podem ser ampliadas por critérios técnicos, tal como a presença de ecossistemas adjacentes relevantes.

A FMP exerce algumas funções, conforme seu caráter de proteção ambiental, tais como:

- assegurar uma área que permita a variação livre dos níveis das águas, em sua elevação ordinária;
- acesso livre à operação de máquinas para execução de serviços de dragagem, limpeza e outros necessários à melhor drenagem fluvial;
- permitir a contemplação paisagística, proporcionando uma melhor qualidade de vida para a população;
- garantir condições para a proteção da mata ciliar

Para ocupar uma área próxima a um curso d'água, qualquer empreendedor (Prefeituras, Órgãos Estaduais e Municipais, pessoas físicas ou jurídicas) precisa solicitar à SERLA, por intermédio de formulário específico, uma planta visada com a Faixa Marginal de Proteção demarcada.

A SERLA, então, estima as vazões de cheia, correspondentes aos tempos de recorrência de 10 (dez) e 20 (vinte) anos, no trecho do curso d'água em pauta. A partir dessa vazão, é calculada a seção hidráulica em terra necessária e suficiente para o escoamento dessa vazão e, finalmente, é determinada a cota mínima de arrasamento.

A FMP é estabelecida, então, como toda a área marginal situada em conta inferior àquela correspondente à seção hidráulica necessária para escoar as vazões de cheia com recorrência de 10 ou 20 anos.

CAPÍTULO 3. ESPACIALIZAÇÃO DAS VAZÕES

3.1 ESCASSEZ DE DADOS

Com relação à disponibilidade de dados fluviométricos que permitam uma adequada caracterização do regime fluvial dos cursos d'água, a situação brasileira é precária. De maneira geral, as redes fluviométricas das bacias hidrográficas brasileiras estão bem distantes da condição desejável. A densidade de postos fluviométricos existentes por bacia é pequena, e a distribuição espacial desses postos é irregular, deixando algumas áreas com muito pouca ou sem qualquer informação.

As estações fluviométricas antigas foram instaladas com o intuito de estudar o potencial hidrelétrico dos cursos d'água, localizando-se apenas nas bacias de grande e médio porte, de maior interesse do setor elétrico, com áreas de drenagem superiores a 500 km².

As pequenas bacias hidrográficas, em sua maior parte, não possuem postos de monitoramento, e quando eles existem estão localizados nos trechos mais baixos do curso d'água principal, de maior área de drenagem, são recentes, e não possuem registradores contínuos. Com isso, as observações disponíveis não permitem a caracterização do comportamento das vazões em toda a bacia, não representando adequadamente suas variações anuais, sazonais e diárias, muito menos as variações horárias.

Como a definição das dimensões máximas de uma pequena bacia sempre apresenta algum grau de subjetividade (Goldenfum, 2003), adotou-se na presente dissertação o conceito de que as pequenas bacias hidrográficas seriam aquelas com áreas de drenagem entre 10 e 100 km², que em sua maior parte não possuem postos de monitoramento. O conceito adotado não pretendeu atender às propriedades listadas por Ponce (1989) para uma bacia hidrológica ser considerada pequena: a precipitação pode ser considerada como uniformemente distribuída no tempo e no espaço, sobre toda a bacia; a duração das tormentas geralmente excede o tempo de concentração da bacia; os processos de armazenamento e de fluxo concentrado na calha dos cursos d'água são pouco importantes. As bacias que atendem a essas propriedades costumam ter dimensões inferiores a 5 km², sendo que, no Brasil, as bacias desse porte só são monitoradas quando eleitas como experimentais.

Mesmo em bacias de médio porte, cujas áreas de contribuição estariam entre 100 e 1.000 km², com frequência os postos estão localizados nos trechos mais baixos do curso d'água principal, mantendo o desconhecimento sobre o regime fluvial próximo às cabeceiras e nos afluentes menores.

Essa situação dificulta também a avaliação das alterações no regime fluvial, e suas conseqüências ambientais, em decorrência das mudanças nas condições naturais das bacias hidrográficas.

No entanto, para que se realize dentro de bases ambientais sustentáveis, a gestão adequada dos recursos hídricos exige um conhecimento adequado do comportamento hidrológico, caracterizado pelas diversas variáveis hidrológicas.

A observação do comportamento histórico dessas variáveis é o que conduz ao melhor entendimento dos processos hidrológicos. Segundo Tucci (2002), nenhum modelo, técnica matemática ou estatística é capaz de criar informações, estas técnicas podem explorar as informações existentes. A falta de informação é crucial no adequado entendimento do comportamento de um sistema hídrico.

A World Meteorological Organization – WMO (1994) recomenda densidades mínimas para redes de monitoramento hidrometeorológico, sendo 1.000 km² de área por estação fluviométrica e 250 km² de área por estação pluviométrica. As densidades mínimas diminuem para áreas litorâneas e aumentam para as regiões montanhosas.

Apesar da rede hidrometeorológica brasileira ter diversas entidades responsáveis e/ou operadoras das estações, a Agência Nacional de Águas – ANA é responsável por manter atualizado o inventário das estações pluviométricas e fluviométricas de todo o território nacional, incluindo aquelas que foram desativadas, não estando mais em operação.

As duas maiores bacias hidrográficas brasileiras localizadas integralmente na região Sudeste são as bacias do rio Doce (código 56 da ANA) e do rio Paraíba do Sul (código 58). Estão situadas numa região de ocupação antiga, com grande densidade populacional e intensa atividade industrial e agropecuária. A demanda de água para usos múltiplos nessas bacias, em especial para abastecimento público, industrial e irrigação é grande. No entanto, o monitoramento fluviométrico em suas pequenas e médias sub-bacias é muito escasso.

A área da bacia do rio Doce totaliza aproximadamente 83.400 km², abrangendo parcelas dos estados de Minas Gerais e Espírito Santo. No inventário de estações fluviométricas do banco de dados *Hidroweb*, da ANA, constam 270 postos na bacia do Doce, sendo que apenas 104 continuam em operação. Portanto, a densidade da rede é de 1 estação por 802 km², bem mais densa que o limite recomendado pela WMO (1 estação por 1875 km²).

A informação sobre o tamanho da área de drenagem no inventário de estações aparece somente em 230, das quais apenas 25 estações têm área de drenagem inferior a 100 km², mas o mais alarmante é que apenas 2 se encontram em operação. Se ampliarmos esse limite para

200 km², a situação não se altera muito, de modo que estão em operação apenas mais 2 estações. Nenhuma das estações em operação dispõe de registrador de nível e apenas uma tem sistema de telemetria.

Em resumo, em toda a bacia do rio Doce, o monitoramento das áreas inferiores a 200 km² é realizado atualmente apenas em 4 locais, de área de drenagem conhecida, sendo que duas estações foram instaladas recentemente, uma em 2001 e outra em 2003.

A bacia do rio Paraíba do Sul (bacia 58) tem área de drenagem de cerca de 55.000 km² distribuídos pelos territórios dos estados de Minas Gerais, Rio de Janeiro e São Paulo. No inventário de estações constam 529 estações fluviométricas nessa bacia, sendo que apenas 240 continuam em operação, o que resulta numa densidade de 1 estação por 229 km², bem superior ao limite mínimo da WMO.

Entre as 418 estações com área de drenagem informada, o número de postos em pequenas bacias é proporcionalmente bem maior que na bacia do rio Doce: 89 postos em áreas inferiores a 200 km². Entretanto, apenas 23 desses postos estão em operação, sendo que somente 9 dispõem de registrador de nível. Como aspecto positivo, algumas dessas estações possuem um longo período de observação, tal como o posto Visconde de Mauá no rio Preto, com área de drenagem de 103 km², instalado em 1941, lamentavelmente sem registrador de nível.

Em resumo, em toda a bacia do rio Paraíba do Sul, o monitoramento das áreas inferiores a 200 km² é realizado atualmente em apenas 23 locais, de área de drenagem conhecida. Vale recordar que essa foi a primeira bacia hidrográfica em que a ANA implantou o sistema de cobrança pelo uso da água nos rios de competência federal e, portanto, a questão do gerenciamento dos recursos hídricos está em destaque por toda a região, mesmo naqueles afluentes para os quais a gestão é de competência estadual. Ainda assim, a condição de monitoramento é precária.

Nas bacias litorâneas fluminenses, a situação não é diferente. Com exceção das parcelas fluminenses das bacias dos rios Paraíba do Sul e Itabapoana, todo o restante do território do Estado do Rio de Janeiro é drenado por pequenas e médias bacias hidrográficas que nascem na Serra do Mar e desembocam diretamente no Oceano Atlântico, denominadas bacias litorâneas. Segundo a codificação da ANA, essas Bacias Litorâneas do Rio de Janeiro formam a Sub-bacia 59, com cerca de 20.370 km² de área continental.

Com o objetivo de estabelecer unidades básicas de planejamento e intervenção da gestão ambiental, o território do Estado do Rio de Janeiro foi dividido em 7 (sete)

Macrorregiões Ambientais – MRA, que foram oficializadas pelo Decreto Estadual nº 26.058 de 14 de março de 2000.

Cada Macrorregião Ambiental abrange uma parte terrestre e outra marinha, sendo que a superfície terrestre de cada MRA compreende uma ou mais bacias hidrográficas. A porção marinha engloba a zona costeira, incluindo baías, enseadas, praias, ilhas, costões rochosos, mangues e uma faixa de mar aberto.

A delimitação das MRA levou em conta critérios técnico-ambientais, administrativos e políticos, partindo do princípio que a bacia hidrográfica é a unidade territorial mais indicada para se promover gestão do meio ambiente, pois, entre outros aspectos, seus limites, os divisores de água, são naturais e, na maioria das vezes, percebidos com facilidade.

A Figura 3.1, a seguir, apresenta os limites das Macrorregiões Ambientais do Estado do Rio de Janeiro. As bacias litorâneas (sub-bacia 59) abrangem as MRA's 1 a 5. As MRA's 6 e 7 correspondem às porções fluminenses das bacias dos rios Paraíba do Sul e Itabapoana.

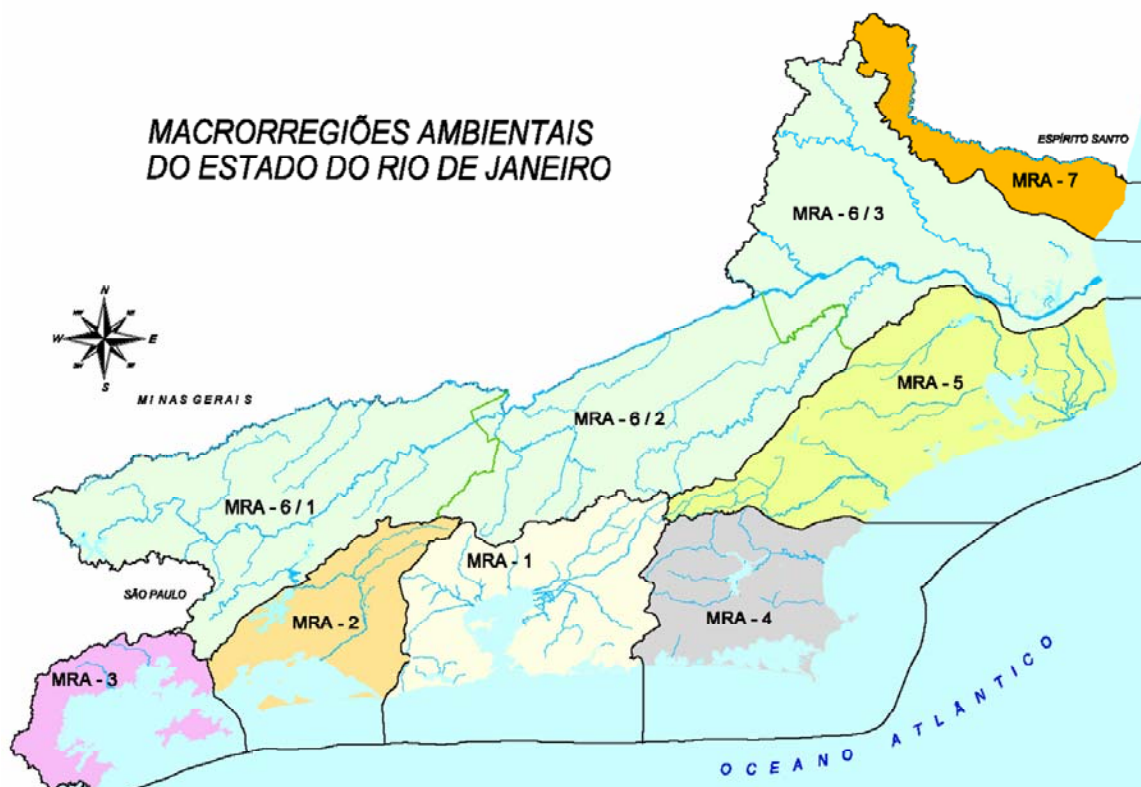


Figura 3.1: Macrorregiões Ambientais do Estado do Rio de Janeiro (SEMADS, 2001)

A MRA-3, conforme definido pelo Decreto nº 26.058, é formada pelas bacias hidrográficas contribuintes à baía da Ilha Grande, entre elas a bacia do rio Mambucaba, e também pelas micro-bacias insulares dessa baía, que contêm mais de 90 ilhas.

Posteriormente, em recente Resolução do Conselho Estadual de Recursos Hídricos - CERHI, de 15/02/07, o Estado do Rio de Janeiro foi dividido em dez regiões hidrográficas, das quais cinco fazem parte das bacias litorâneas (Sub-bacia 59): RH Baía da Ilha Grande; RH Guandu; RH Baía da Guanabara; RH Lagos São João; e RH Macaé e Rio das Ostras. Portanto, a metade das regiões hidrográficas definidas pelo Conselho Estadual está situada em bacias litorâneas.

Apesar do porte reduzido das áreas de contribuição dessas bacias litorâneas, nessa área estão localizados: toda a Região Metropolitana do Rio de Janeiro; cidades de grande atividade econômica, como Macaé e Itaguaí; cidades de destacado interesse turístico, como Angra dos Reis e Búzios; e empreendimentos energéticos de interesse nacional, como a usina nuclear de Angra, da Eletronuclear, e a refinaria de petróleo de Duque de Caxias, da Petrobrás.

No inventário de estações da ANA, constam 317 estações fluviométricas na Sub-bacia 59 (bacias litorâneas), das quais apenas 43 estão em operação.

A área de drenagem está informada em somente 26 das estações em operação, sendo que predominam as áreas de contribuição inferiores a 200 km², com 16 estações. Essa predominância está relacionada com o porte reduzido das bacias litorâneas. Por exemplo, em toda a Sub-bacia 59, apenas uma estação fluviométrica em operação tem área superior a 1.000 km². Contudo, o número de estações é insuficiente para fornecer dados que subsidiem a análise dos processos de outorga e a gestão dos recursos hídricos.

Em recente trabalho de regionalização de vazões elaborado pela CPRM para a Sub-bacia 59 (CPRM, 2002), foi adotada a metodologia proposta por Tucci (2002). Os critérios de seleção das estações foram: a representatividade da série; e a disponibilidade de, pelo menos, cinco anos hidrológicos completos, ou ainda, para estudos das máximas e mínimas, períodos completos de cheia ou estiagem. Após análise das séries fluviométricas disponíveis, apenas 12 estações atenderam aos critérios estabelecidos, sendo onze em operação e uma desativada.

A bacia hidrográfica do rio Mambucaba, onde foi realizada a aplicação do TOPMODEL apresentada nesta dissertação, faz parte da Sub-bacia 59 e da RH Baía da Ilha Grande.

Pelos exemplos apresentados, pode-se avaliar como a escassez de dados hidrológicos é um complicador para a gestão de recursos hídricos no Brasil, especialmente no caso das bacias de pequeno e médio porte, entre 10 e 1.000 km².

No caso do Estado do Rio de Janeiro, a situação da gestão dos recursos hídricos pela SERLA se agrava, especialmente, pela necessidade de atendimento das demandas crescentes de abastecimento público e industrial nas áreas litorâneas, a análise dos pedidos de outorga de água para diversos outros usos nas bacias, assim como a definição da faixa marginal de proteção dos corpos hídricos, continuamente pressionada pela expansão urbana.

Além disso, essa escassez de dados hidrológicos nas bacias litorâneas se estende pelo litoral de todo a região Sudeste. Os estados do Espírito Santo e de São Paulo apresentam também uma frágil condição de monitoramento.

A sub-bacia 80, que abrange toda as bacias hidrográficas do litoral norte do Estado de São Paulo, também carece de dados fluviométricos disponíveis: em toda a sua área existem apenas 10 postos fluviométricos com dados disponíveis de vazão, sendo três no banco de dados Hidroweb da ANA e sete no banco de dados do DAEE. Entre esses postos, apenas seis possuem mais de 10 anos de registros e somente dois continuam em operação.

A escolha da bacia do rio Mambucaba para estudo de caso, nesta dissertação, teve origem na constatação da necessidade do conhecimento hidrológico para fundamentar a gestão dos recursos hídricos e, contraditoriamente, da escassez de dados disponíveis nas bacias litorâneas, entre elas, a bacia do próprio Mambucaba.

3.2 REGIONALIZAÇÃO DE VAZÕES

Como os dados hidrometeorológicos são medidos em locais fixos, uma rede de postos pluviométricos ou fluviométricos dificilmente cobre todos os locais de interesse, principalmente no momento atual em que o gerenciamento adequado dos recursos hídricos necessita do conhecimento hidrológico em bacias hidrográficas de todos os tamanhos. Com frequência, surgem conflitos pelo uso da água justamente nas bacias de pequeno e médio porte, porque nelas a disponibilidade hídrica é menor.

A regionalização é estabelecida, então, com o objetivo de obter informação hidrológica em locais sem ou com poucos dados. O termo regionalização tem sido utilizado em hidrologia para determinar a transferência de informações de um local para outro dentro de uma área com comportamento hidrológico semelhante (Tucci, 2002).

Podem ser regionalizadas, em hidrologia, variáveis, funções, parâmetros ou indicadores regionais. A *variável* é uma identificação do comportamento de um processo ou fenômeno, tal como a vazão instantânea de um rio em determinada seção. Já a *função* representa uma

relação entre uma variável hidrológica e uma ou mais variáveis explicativas ou estatística. Um exemplo de função é a curva de permanência. O *parâmetro* é definido como uma característica do sistema hídrico, tal como o coeficiente de rugosidade. Finalmente, os *indicadores regionais* são valores médios de variáveis ou proporções que permitam uma rápida estimativa de uma variável ou entendimento de seu comportamento, por exemplo, a vazão específica média ou a relação entre vazão mínima e média.

Segundo Tucci (2002), o ideal do hidrólogo é determinar a variável desejada com base em medidas das características físicas da bacia. No entanto, o infinito número de combinações possíveis entre os diversos fatores que influem na variabilidade hidrológica pode produzir resultados variados.

Nos estudos de regionalização, as variáveis explicativas são definidas como sendo aquelas usadas para estimar o valor das variáveis regionalizadas, devendo ser atendidas as seguintes condições:

- as variáveis explicativas devem ser facilmente determinadas pelo usuário da regionalização, pois caso contrário a metodologia dificilmente será utilizada;
- na determinação das variáveis explicativas, devem ser evitados métodos indiretos com muitas incertezas;
- na introdução de uma nova variável explicativa, verificar se haverá significativo aumento de informação, pois muitas variáveis explicativas possuem forte correlação entre si;
- a regionalização deverá fornecer metodologia de estimativa das variáveis explicativas nas diversas áreas em que a regionalização for válida e puder ser aplicada;
- a regionalização deverá informar os níveis de incertezas para a estimativa da variável dependente.

O Quadro 3.1 a seguir apresenta alguns exemplos de variáveis utilizadas na regionalização.

Quadro 3.1: Exemplos de Variáveis na Regionalização

Variável Regionalizada	Variáveis Explicativas
Vazão média	Área da bacia, precipitação
Vazão média de cheia	Área da bacia, precipitação, declividade e comprimento do rio
Vazão mínima	Área da bacia e densidade de drenagem
Tempo de concentração	Comprimento, declividade, área da bacia

Fonte: Tucci (2002)

Silva Júnior et al (2003) observaram que apesar da regionalização se caracterizar por ser uma ferramenta útil para o conhecimento hidrológico espacial, existem sérias limitações à extrapolação dos seus resultados para bacias de menor porte, gerando incertezas na tomada de decisão. A regionalização não substitui as informações, apenas busca uma melhor estimativa em face das incertezas existentes.

A partir dessa reflexão, realizaram um estudo sobre a extrapolação espacial da regionalização para algumas variáveis hidrológicas, através da avaliação dos resultados com base em dados existentes em duas regiões distintas: a bacia do rio Ijuí, afluente do rio Uruguai, no Rio Grande do Sul; e a bacia do rio Paraopeba, afluente do rio São Francisco, em Minas Gerais.

Foram adotadas bacias de porte médio, entre 400 e 11.000 km², para o estabelecimento da regionalização. Para a verificação da extrapolação para bacias menores foram utilizadas bacias com áreas entre 0,125 e 22,0 km², e para bacias maiores foram utilizados postos com até 100.000 km².

As variáveis regionalizadas foram: a vazão média de longo período; a vazão média de cheia; a vazão mínima com duração de 7 dias e 10 anos de período de retorno ($Q_{7\text{dias},10\text{anos}}$); e a curva de permanência de vazões. Segundo Silveira & Silveira (2003), a $Q_{7\text{dias},10\text{anos}}$ corresponde um valor que, em média, a cada 10 anos, será igualado ou inferiorizado pelo escoamento médio de estiagem do rio em quaisquer 7 dias consecutivos. O período de retorno, por sua vez, corresponde a um tempo médio e não a um intervalo constante de reparação de determinada vazão mínima. Para as bacias estudadas, os resultados mostraram os seguintes aspectos:

- Para as vazões médias de cheias, a extrapolação superior não apresenta grandes incertezas e na extrapolação inferior o erro foi pequeno até 20 km²;
- Para a vazão média de longo período, existem incertezas na extrapolação para bacias com área inferior a 10 km²;
- Para a curva de permanência, observa-se uma boa extrapolação inferior até 10 km² e nas demais bacias (< 10km²) a regionalização superestima as vazões;
- Para a vazão $Q_{7\text{dias},10\text{anos}}$ verifica-se uma boa extrapolação superior e inferior até 10 km², ocorrendo a superestimativa na extrapolação inferior em áreas menores que 10 km².

Os autores concluíram que, nas bacias estudadas, o erro é limitado na extrapolação para bacias maiores que as usadas na regionalização, enquanto que, para bacias menores, os

resultados se mostraram aceitáveis até 20 km². Nas vazões mínimas, a extrapolação tende a superestimar a vazão desejada.

Esse fato prejudica seu emprego nas análises dos processos de outorga, quando a estimativa das vazões mínimas é requerida.

Silva Júnior et al (2003) fazem a ressalva de que esses resultados devem ser vistos como preliminares, embora contribuam para o entendimento da extrapolação regional numa região onde os condicionamentos hidrológicos não mostram grande variabilidade.

No trabalho de regionalização de vazões da Sub-bacia 59 (CPRM, 2002), foram utilizadas estações com áreas de drenagem que variaram entre 22 e 597 km², posteriormente estabelecidos como limites para utilização das curvas de regressão finais obtidas para: vazão média de longo período; vazão média de cheia; vazão mínima de 10 anos de recorrência para durações de 1 a 60 dias; vazões de 50% e 95% de permanência.

As estações fluviométricas Fazenda das Garrafas (22 km²) e Fazenda Fortaleza (597 km²), empregadas como limites inferior e superior da área de drenagem para aplicação da regionalização, estão localizadas em uma mesma bacia: a do rio Mambucaba, e seus dados também foram utilizados no desenvolvimento do presente trabalho.

Apesar do indiscutível mérito desse trabalho, que rapidamente transformou-se em referência para inúmeros outros estudos, pela necessidade de respostas dessa natureza, ele tem uma fragilidade que não pode ser esquecida: os poucos dados disponíveis e sua irregular distribuição espacial. Vale lembrar que a Sub-bacia 59 tem uma área aproximada de 20.370 km², distribuídos ao longo de todo o litoral fluminense de Macaé a Paraty, e apenas 12 estações foram utilizadas, em decorrência da escassez de postos e dados nas bacias litorâneas.

Posteriormente, o Grupo de Estudos de Hidrologia e Planejamento de Recursos Hídricos – GRHIP (2006), elaborou, na UERJ, os Estudos Relativos a Estimativas de Vazões $Q_{7,10}$ na Bacia Hidrográfica da Baía da Ilha Grande (RJ), que visavam subsidiar as solicitações de outorga da Eletronuclear nessa região.

Entre as conclusões desse estudo, foi ressaltado que tanto os estudos de Francisco (2004) como os da CPRM (2002) identificaram a região da baía da Ilha Grande como uma sub-região hidrográfica distinta entre as outras da Sub-bacia 59, na qual está inserida. Isso justificaria o estabelecimento de equações regionais específicas para a bacia hidrográfica da baía da Ilha Grande.

No entanto, foi observada também uma fragilidade nas séries históricas de vazões dessa região hidrográfica. Nelas não se verificam, os seguintes itens, indicados por Tucci (2002), como desejáveis em estudos de regionalização:

- boa espacialização dos locais de monitoramento: dos seis postos fluviométricos, três estão localizados ao longo do rio Mambucaba;
- séries com históricos de pelo menos 20 anos de duração: três dos postos usados possuem históricos menores, sendo dois deles com menos de 10 anos de duração;
- homogeneidade das séries históricas: três dos postos usados nos estudos, já não estão mais em operação;
- bom nível de consistência das séries: os postos que não estão em operação, não possuem levantamento de perfil de seção transversal de escoamento, nem vestígios de sua localização.

Nessas circunstâncias, é recomendada a aplicação de modelos hidrológicos nos estudos de disponibilidade hídrica, já que permitem melhor compreensão do comportamento hidrológico, como também a extensão de séries fluviométricas.

Como a aplicação de um modelo hidrológico não foi possível naquele período, o estudo do GRHIP, além das estimativas dos valores de $Q_{7,10}$ a partir dos trabalhos de Francisco (2004) e CPRM (2002), fez uma revisão das séries de vazões disponíveis, que envolveu redefinição das curvas-chaves e uma análise de consistência das cotas fluviométricas. A partir das séries revisadas, foram redefinidos valores para $Q_{7,10}$ e definida uma outra equação regional, adotando a área de drenagem como variável independente e explicativa.

Foi observado que os valores obtidos para $Q_{7,10}$, pelo GRHIP, nos locais de interesse para captação por parte da Eletronuclear foram sempre superiores aos valores determinados a partir da aplicação das equações regionais apresentadas nos estudos da CPRM. O GRHIP recomendou, então, que nessas situações de solicitação de outorga fossem considerados, em favor da segurança, sempre os menores valores estimados para $Q_{7,10}$, mas ficou evidente o alto grau de incerteza envolvido.

Além da importância das nascentes para a sustentabilidade ambiental dos rios e da conhecida fragilidade das pequenas bacias hidrográficas, como não há monitoramento nessas bacias, aumentam as incertezas nas estimativas das vazões para essas áreas de drenagem a partir da aplicação das técnicas de regionalização desenvolvidas até o momento. Isso inclusive, em situações críticas, pode levar ao desabastecimento, indesejável para o usuário.

Por fim, foi ressaltada a importância da ampliação do monitoramento hidrometeorológico na região hidrográfica da baía da Ilha Grande.

A incerteza sobre vazões relatada pelo GRHIP para a baía da Ilha Grande pode ser generalizada para todas as bacias litorâneas fluminenses, exigindo tempo para monitoramento e aprofundamento dos estudos hidrológicos. No entanto, as solicitações de outorga para abastecimento público e industrial e os pedidos de autorização para ocupação das margens dos cursos d'água exigem respostas rápidas e precisas. Erros nessas respostas têm como consequência danos ambientais.

Segundo Silva Júnior et al (2003), existem dois níveis de transferência da informação hidrológica na regionalização:

- a interpolação espacial de variáveis e funções baseadas na *similaridade hidrológica*, que envolvem a determinação das mesmas em locais com dados escassos, mas com características semelhantes às utilizadas na regionalização e que, portanto, possuem medidas;
- a extrapolação de variáveis e funções baseadas no comportamento da escala dos processos hidrológicos.

Mesmo quando não há necessidade de extrapolação, a definição de *similaridade* é de fundamental importância para a regionalização. Estudos anteriores definem similaridade com base na proximidade geográfica (Mosley, 1981; Silva Júnior et al, 2003). Entretanto, outros estudos têm mostrado que apenas a proximidade geográfica não possui atributos suficientes. Outros indicadores da bacia também devem ser utilizados (Acreman & Sinclair, 1986; Nathan & McMahon, 1990; Zrinji e Burn, 1994).

Vorst e Bell (1981; Silva Júnior, 2003) verificaram várias relações na regionalização do escoamento médio e do volume superficial. Os autores identificaram apenas três variáveis físicas significativas para explicar as vazões: a área da bacia; o comprimento do curso d'água principal; e a declividade.

A maioria dos estudos, contudo, tem considerado a área como a única característica da bacia para relacionar as variáveis hidrológicas. No entanto, Silva Júnior et al (2003) concluem que não pode ser descartada a necessidade da análise do ganho estatístico da correlação entre a variável dependente e outras variáveis explicativas, tais como: a precipitação, a densidade de drenagem e a declividade. O importante é ter a consciência de que nenhum tipo de dado pode ser inventado, o que se deve é buscar da melhor maneira possível extrair o máximo de informações dos dados existentes e, utilizá-las com suas devidas ressalvas.

O estudo de regionalização de vazões elaborado pela CPRM para a Sub-bacia 59 (2002) incorporou a precipitação média anual como variável explicativa.

Finalmente, com base nos resultados apresentados no capítulo 4, a presente dissertação propõe que no aprofundamento dos estudos de regionalização das bacias litorâneas seja considerado, também, o índice topográfico proposto por Kirkby (1975) como uma variável explicativa. O índice topográfico incorpora duas variáveis significativas do comportamento hidrológico: a área de contribuição e a declividade do terreno em um determinado ponto da bacia. No modelo TOPMODEL, o índice topográfico representa a tendência de um determinado ponto da bacia desenvolver condições saturadas, caracterizando também a similaridade hidrológica, pois na conceituação do modelo todos os pontos com o mesmo valor de índice topográfico apresentam o mesmo comportamento hidrológico. O capítulo 5 apresenta melhor essa proposta.

3.3 USO DAS TÉCNICAS DE GEOPROCESSAMENTO

Geoprocessamento pode ser definido como a tecnologia que abrange o conjunto de procedimentos de entrada, manipulação, armazenamento e análise de dados espacialmente referenciados (Teixeira & Christofolletti, 1997).

Conforme enfatizado por Mendes & Cirilo (2001), uma característica única dos recursos hídricos é a grande variabilidade espacial de suas propriedades. Em geral, amostras destas propriedades são coletadas pontualmente no terreno sendo então assumido, através de uma análise estatística, por exemplo, que elas têm uma distribuição uniforme numa dada área. O problema desta abordagem é que a natureza apresenta uma complexa distribuição espacial destas propriedades, sendo necessário o uso desta informação distribuída no espaço para permitir uma representação mais realista do meio ambiente.

Grande parte dos trabalhos existentes baseia-se em um número limitado de amostras pontuais, mas as funções que descrevem os fenômenos hidrológicos são extremamente dependentes das escalas de espaço e de tempo em tais fenômenos são observados.

Por exemplo, nas bacias litorâneas do Estado do Rio de Janeiro (Sub-bacia 59), as chuvas e níveis d'água são observados diariamente em vários pontos. No entanto, toda essa região é drenada por pequenas (áreas entre 10 e 100 km²) e médias bacias hidrográficas (áreas entre 100 e 1.000 km²), que nascem na Serra do Mar e desembocam diretamente no Oceano Atlântico. Na maior parte dessa região, o tempo de concentração é pequeno, de minutos ou

horas, de modo que os hidrogramas resultantes do monitoramento perdem qualidade na representação da realidade. Nessas condições, o conhecimento do comportamento hidrológico necessita de um monitoramento com registradores contínuos.

As Figuras 3.2 e 3.3 mostram a localização dos registradores de chuva e de nível d'água em operação nas bacias litorâneas. Pode-se observar que o número de postos é reduzido e a distribuição espacial deles não é uniforme. A região da baía da Ilha Grande, localizada no canto esquerdo das figuras, tem apenas dois registradores de chuva e nenhum registrador de nível d'água. Além disso, na região serrana, os registradores de chuva existentes estão concentrados em alguns afluentes da Baía da Guanabara. Quanto aos registradores de nível d'água, existem também três localizados na região serrana da baía de Sepetiba, que fazem parte do monitoramento do Complexo Hidrelétrico de Lajes.

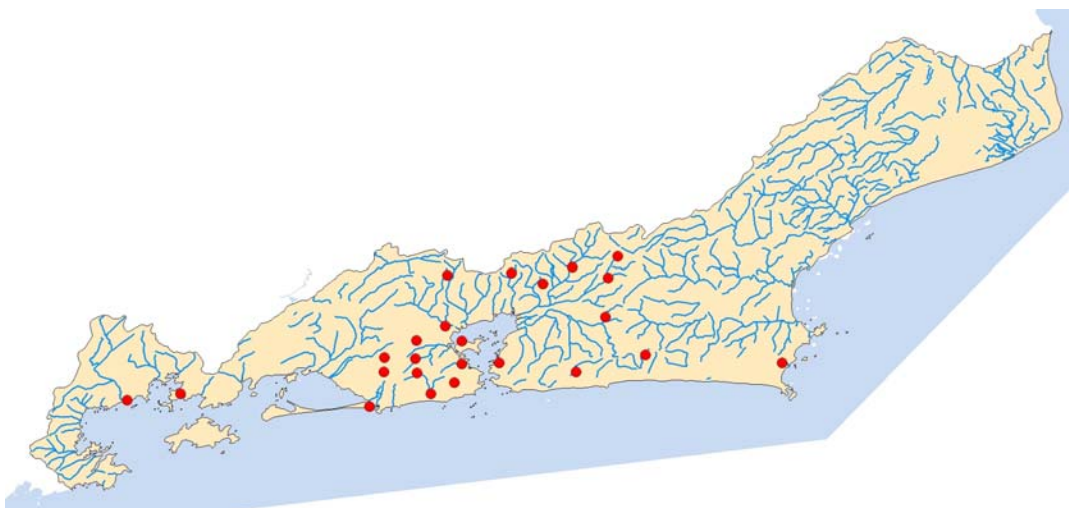


Figura 3.2: Registradores de Chuva nas Bacias Litorâneas do Estado do Rio de Janeiro (Sub-bacia 59)

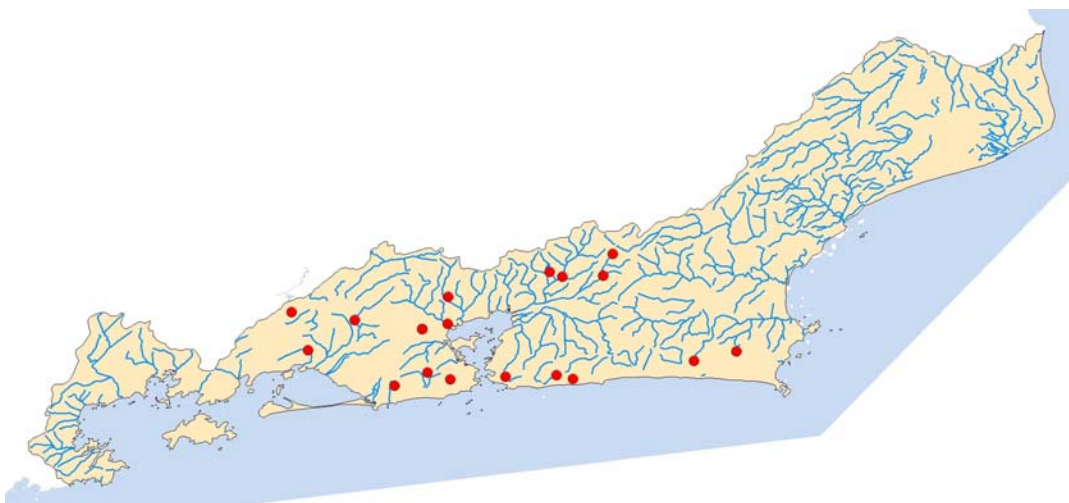


Figura 3.3: Registradores de Nível d'Água nas Bacias Litorâneas do Estado do Rio de Janeiro (Sub-bacia 59)

Segundo Tucci (2002), a variabilidade das condições hidrológicas é um processo estocástico no tempo e no espaço, que depende da combinação de vários fatores como: precipitação; evapotranspiração; relevo; geologia; geomorfologia; solos; cobertura vegetal e uso do solo; e atividades antrópicas sobre o sistema fluvial. Esse grande conjunto de fatores transforma a estimativa das variáveis hidrológicas num problema complexo dependente das estatísticas de valores conhecidos. Como o infinito número de combinações possíveis entre os fatores citados anteriormente pode produzir resultados variados, nenhum estudo de regionalização hidrológica substitui uma rede adequada de monitoramento hidrológico. Este tipo de análise apenas retrata espacialmente as informações na rede que, se não forem apropriadas, comprometerão os resultados. Assim, a falta generalizada de dados de pequenas bacias hidrográficas no Brasil não pode ser suprida pela regionalização.

A partir dessa constatação, a presente dissertação propõe que as técnicas de geoprocessamento sejam utilizadas não como uma solução milagrosa para a falta de dados básicos, mas como uma ferramenta de apropriação das informações disponíveis e de apoio na definição de prioridades quanto à própria rede de monitoramento.

As variáveis de interesse em recursos hídricos são coletadas em pontos bem definidos sobre o terreno. Entretanto, estas variáveis são na verdade contínuas no espaço, devendo ser representadas através de superfícies e não pelo conjunto de pontos. O processo de transformação destes pontos para a superfície é conhecido como interpolação. Como representam a realidade, pontos próximos tendem a ter valores similares, sendo a recíproca também verdadeira. Então os valores pontuais não podem ser considerados independentes uns dos outros (auto-correlação espacial) tornando necessário o uso de tratamentos mais sofisticados para interpolação desses dados (Mendes & Cirilo; 2002).

A evolução dos recursos de geoprocessamento e a disponibilização de dados tornaram viável a utilização de sistemas de informação geográfica e modelos digitais de terreno em hidrologia. Um Sistema de Informação Geográfica – SIG (ou *Geographic Information System – GIS*) é um sistema computacional que permite ao usuário coletar, manusear e analisar dados georreferenciados. Um SIG pode ser visto como a combinação de *hardware*, *software*, dados, metodologias e recursos humanos, que operam de forma harmônica para produzir e analisar informação geográfica (Teixeira & Christofolletti, 1997). Um Modelo Digital de Elevação – MDE (ou *Digital Elevation Model – DEM*), também denominado Modelo Digital de Terreno – MDT (ou *Digital Terrain Model – DTM*), é uma representação digital de um modelo numérico da superfície da Terra (MNT), obtido a partir de um conjunto de coordenadas (x, y, z) de pontos distribuídos no terreno (Teixeira & Christofolletti, 1997).

Rosa (2002) propôs a utilização de SIG juntamente com modelos chuva-vazão, mais especificamente o modelo IPH II, com o objetivo de determinar a influência do processo de urbanização na ação catalisadora dos grandes eventos de cheia. Para isso, propôs uma metodologia de obtenção dos parâmetros do citado modelo através de técnicas de geoprocessamento, que foi aplicada a uma área urbana denominada Lote 3, na bacia de Jacarepaguá, zona oeste do município do Rio de Janeiro. Os resultados do trabalho demonstraram que as técnicas utilizadas de geoprocessamento podem auxiliar na rápida apropriação dos parâmetros fisiográficos para aplicação na modelagem hidrológica, em especial, de bacias urbanas.

Outro exemplo é o projeto denominado *Shuttle Radar Topographic Mission - SRTM*, executado em conjunto entre a *National Imagery and Mapping Agency - NIMA* e a *National Aeronautics and Space Administration - NASA*, ambas dos EUA, teve por objetivo gerar dados topográficos digitais (Modelo Digital do Terreno - MDT) correspondentes a aproximadamente 80% da superfície terrestre. Sua disponibilização é efetuada através do *United States Geological Survey - USGS* e do *Eros Data Center - EDC*.

Conforme descrito em Barros et al (2005), os dados foram obtidos através da utilização de um radar (SAR) a bordo do ônibus espacial Endeavour, que adquiriu dados sobre mais de 80% da superfície terrestre, fazendo uso da técnica de interferometria. Nesta técnica a altitude é obtida através da medição da diferença de fase entre duas imagens radar sobre um mesmo local na Terra. Os dados foram adquiridos com resolução de aproximadamente 30 metros, no equador. Os DEM's relativos à banda C estão sendo distribuídos pela NASA, já se encontrando disponíveis gratuitamente para as Américas do Sul e do Norte, com resolução espacial de aproximadamente 90 x 90 metros. Há a possibilidade de se adquirir dados com resolução de 30 x 30 metros dependendo de acordos analisados individualmente pela NASA.

Infelizmente, o MDT disponibilizado pelo USGS apresenta vazios de dados em determinados locais, ou seja, áreas para as quais não foram determinadas as altitudes, devido a problemas de "sombra" na recepção dos sinais de radar, ou de deficiência nas propriedades reflexivas da área em questão.

Uma das vantagens do uso do MDT em hidrologia, vislumbrados no decorrer do presente trabalho, seria enriquecer os estudos de espacialização das vazões, através da apropriação e representação das informações do relevo. Vorst e Bell (1981; Silva Júnior, 2003) identificaram apenas três variáveis físicas significativas para explicar as vazões: a área da bacia; o comprimento do curso d'água principal; e a declividade. A área da bacia é normalmente utilizada em estudos dessa natureza. O comprimento do curso d'água principal

pode ser facilmente obtido de mapas digitais com a rede hidrográfica da bacia. A declividade da bacia é mais complexa, mas pode ser obtida a partir de um MDT.

No entanto, uma outra possibilidade seria o uso do MDT dentro de um ambiente GIS para cálculo do índice topográfico de Kirkby, que reúne informações da área de contribuição e da declividade em uma só variável. Tanto o índice topográfico médio como a curva de distribuição na bacia poderiam ser introduzidas como mais uma variável explicativa nos estudos de regionalização de vazões.

Uma outra vantagem do uso do MDT dentro de um ambiente GIS é permitir a geração das informações necessárias para a modelagem hidrológica distribuída ou semi-distribuída. Uma bacia hidrográfica pode ser tratada como sendo a composição de numerosos pontos, onde a precipitação, infiltração, evaporação e escoamento formam um balanço hídrico local. Cada ponto nesta superfície contínua (bacia) pode ser associado a uma área na qual os valores médios são obtidos. O uso desta informação geográfica permite uma representação mais realista do meio ambiente, através de modelos matemáticos (Mendes & Cirilo; 2002).

Para aplicação do modelo TOPMODEL, neste trabalho, foi utilizado um MDT dentro de um ambiente GIS para obtenção das informações da bacia do rio Mambucaba necessárias à modelagem.

3.4 REGIÃO DA BAÍA DA ILHA GRANDE E A BACIA DO RIO MAMBUCABA

3.4.1 Características Gerais

A região da Baía da Ilha Grande e, em especial, a bacia hidrográfica do rio Mambucaba foi selecionada para o estudo de caso apresentado nessa dissertação, em função de sua importância ambiental, inclusive em nível nacional, e a representatividade de suas características hidrológicas e condições de monitoramento fluviométrico, no tocante às bacias litorâneas dos estados da região Sudeste.

Conforme apresentado anteriormente, de acordo com o Decreto Estadual nº 26.058, de 14 de março de 2000, a MRA-3 é formada pelas bacias hidrográficas contribuintes à baía da Ilha Grande, entre elas a bacia do rio Mambucaba. E em recente Resolução do Conselho Estadual de Recursos Hídricos - CERHI, de 15 de fevereiro de 2007, o Estado do Rio de Janeiro foi dividido em dez regiões hidrográficas, sendo uma delas a RH Baía da Ilha Grande.

O conjunto das bacias hidrográficas contribuintes à baía da Ilha Grande está localizado nos Estados do Rio de Janeiro e de São Paulo, tendo como limites: ao norte, o Planalto da Bocaina; ao sul, o Oceano Atlântico; a leste, a Baía de Sepetiba, e a oeste, a região da Baía da Ilha de São Sebastião (Ilhabela).

As bacias que drenam para a Baía da Ilha Grande têm uma superfície de 1.740 km², que inclui parte dos territórios dos municípios de Angra dos Reis e Paraty, no Rio de Janeiro, e Arapeí, Bananal, Cunha e São José do Barreiro, no Estado de São Paulo.

Na área contribuinte à Baía da Ilha Grande podem ser identificadas três unidades fisiográficas: o Planalto da Bocaina, com altitudes entre 1.000 e 2.000 m; a escarpa da Serra do Mar, com altitudes máximas de até 1.000 m; e a planície litorânea que se estende em uma estreita faixa ao longo do litoral. A maior parte da área está no planalto e na serra, ficando apenas cerca de 5% na planície.

Por ser coberta pela Mata Atlântica, a área contribuinte à Baía da Ilha Grande é considerada como de grande importância ambiental, uma vez que este bioma encontra-se ameaçado de desaparecimento. A Constituição Federal (parágrafo 4º do art. 225) considera a Mata Atlântica como um patrimônio nacional, e sua utilização deverá ocorrer dentro de condições que assegurem a preservação do meio ambiente, inclusive quanto ao uso dos recursos naturais.

O rio Mambucaba é um dos maiores cursos d'água que desembocam na Baía da Ilha Grande. Nasce no Planalto da Bocaina, a uma altitude de 2.080m. A área de drenagem de sua bacia tem 597 km², e inclui parcelas dos territórios dos municípios de Angra dos Reis (RJ) e Cunha (SP).

3.4.2 Clima

O clima da região da Baía da Ilha Grande é classificado como tropical úmido. A região possui o maior índice pluviométrico do Estado do Rio de Janeiro, sendo que os maiores índices são verificados nas partes mais íngremes da região, devido principalmente à orientação frontalmente exposta à massa de ar úmida, pois a maioria das chuvas é orográfica. Também ocorrem eventos frontais e convectivos, gerando tormentas de grande intensidade (GRHIP, 2006).

A estação climatológica Angra dos Reis (código ANA 2344013) está localizada no município de mesmo nome, sendo a mais próxima à bacia do rio Mambucaba, segundo o

inventário de estações da ANA. Foi instalada em 1913 e continua sendo operada pelo INMET (código 83788).

Além dessa, as estações identificadas como mais próximas e também operadas pelo INMET, foram a de Ubatuba (ao sul de Paraty) e a de Taubaté, já na bacia do rio Paraíba do Sul (GRHIP, 2006). Na Usina Nuclear de Angra, existe uma estação de monitoramento climatológico de instalação mais recente (1982), cujos dados foram cedidos, pela Eletronuclear, e utilizados no presente trabalho na etapa de modelagem.

Para caracterizar a sazonalidade do clima da região de estudo, foram utilizados os resultados da estação de Angra dos Reis publicados nas Normais Climatológicas (DNMET, 1992), que abrangem o período 1961 a 1990, por serem dados resultantes de informações submetidas a estudos sistemáticos de consistência de dados.

A temperatura média anual em Angra dos Reis é $25,5^{\circ}\text{C}$, com valores médios mensais oscilando entre $26,4^{\circ}\text{C}$ e $20,2^{\circ}\text{C}$ ao longo do ano. O trimestre mais frio vai de junho a agosto e o mais quente ocorre de janeiro a março. No inverno, os valores normais de temperatura mínima baixam a $16,5^{\circ}\text{C}$, em julho, e alcançam a temperatura máxima de $30,4^{\circ}\text{C}$ em fevereiro, durante o verão. A Figura 3.4 a seguir ilustra o comportamento das temperaturas em Angra dos Reis.

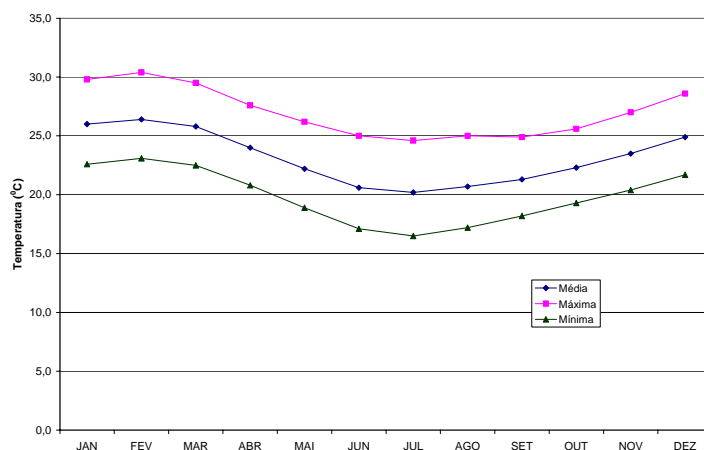


Figura 3.4: Temperaturas Média, Máxima e Mínima em Angra dos Reis (1961-1990)

A bacia hidrográfica do rio Mambucaba até o posto fluviométrico de Fazenda Fortaleza, selecionada para o estudo de caso, tem uma altitude média de 1250m, ficando a altitude máxima em torno de 2080m. A estação climatológica de Angra dos Reis está localizada a uma altitude de 2m, portanto, ao nível do mar. Por isso, as temperaturas na bacia do Mambucaba, como um todo, devem ser significativamente menores.

A estação de Angra apresenta evaporação anual em torno de 595,3 mm, com totais mensais entre 42,2 mm (junho) e 59,8 mm (janeiro). Existe um comportamento bastante uniforme nas evaporações mensais médias, com pouca variação ao longo do ano. Esses valores normais são inferiores a outros locais das bacias litorâneas, mesmo aqueles próximos ao oceano, como o caso de Mangaratiba, localizada na baía de Sepetiba, cuja evaporação anual fica em torno de 1115,7mm.

As precipitações em Angra são marcadas pela sazonalidade. A precipitação média anual é aproximadamente 1976,7mm, bem superior a Mangaratiba, que fica em torno de 1576,3mm. Essa diferença na precipitação pode explicar a variação inversa observada entre as duas estações quanto à evaporação.

O período mais chuvoso em Angra dos Reis vai de dezembro a fevereiro, e o mais seco de junho a agosto. Os valores normais mensais oscilam entre 76,2 mm, em julho, e 276,4 mm, em janeiro. A Figura 3.5 apresenta os valores normais dos totais precipitados e da evaporação, mostrando também um balanço entre essas duas variáveis. Pode-se observar que as chuvas mensais médias são sempre superiores às evaporações, mesmo nos meses de estiagem.

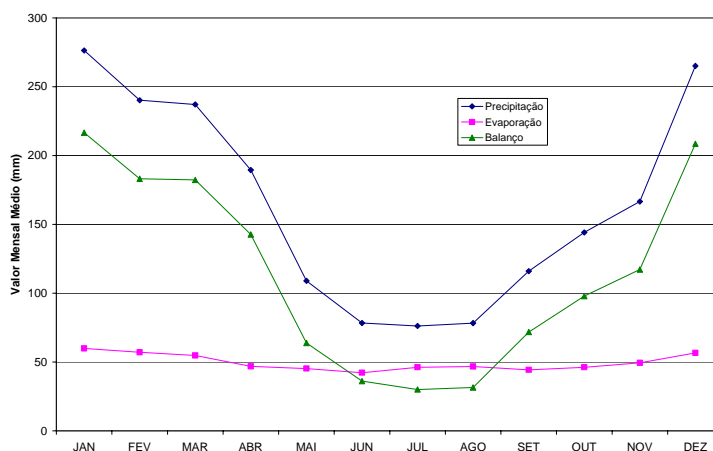


Figura 3.5: Precipitação e Evaporação Mensal em Angra dos Reis (1961-1990)

Uma outra variável climatológica importante é a intensidade das chuvas. A Figura 3.6 apresenta as precipitações máximas em 24 horas registradas no período de 1961 a 1990 em Angra dos Reis. Foi registrado um evento excepcional, com total de chuva igual a 285,6 mm, ocorrido em 23/01/67. Esse valor é superior a 276,4 mm, que é a média de janeiro. Portanto, choveu em 24 horas o volume equivalente ao mês mais chuvoso do ano.

Essa alta intensidade das chuvas provavelmente é decorrente da proximidade da região serrana, que provoca um efeito orográfico, o que talvez explique também a ocorrência de chuvas de 24 horas em torno de 140mm mesmo nos meses mais secos do ano: julho e agosto.

A ocorrência de chuvas muito intensas é um fator indutor de problemas ambientais, tais como inundações, deslizamentos e desabamentos nas áreas urbanas, assim como fortes processos erosivos quando a declividade do terreno é muito acentuada, mesmo nas áreas florestadas como no caso de grande parte da bacia do rio Mambucaba.

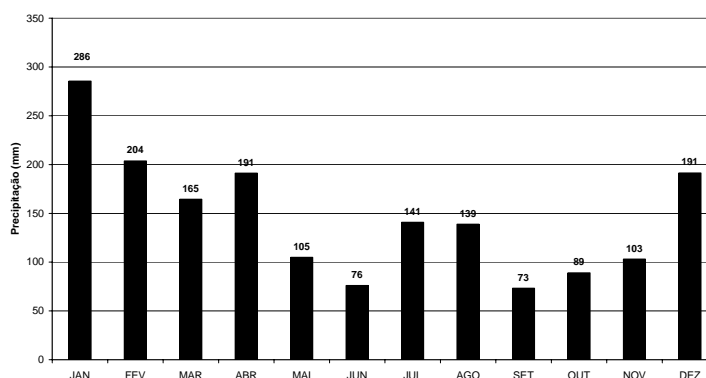


Figura 3.6: Precipitação Máxima em 24 Horas de Angra dos Reis (1961-1990)

Aliás, essa é uma condição freqüente nas bacias litorâneas da região Sudeste, de modo geral. As áreas altas, mesmo que tenham boa cobertura vegetal, apresentam fortes declividades. A ocorrência de chuvas orográficas muito intensas origina hidrogramas com altos picos de vazão. Quando escoam através de áreas urbanas, bastante impermeabilizadas, os hidrogramas de forma aguda provocam inundações e erosões.

Apesar disso, apenas dois afluentes em toda a baía da Ilha Grande têm monitoramento da chuva em suas bacias: os rios Mambucaba e Perequê-Açu.

3.4.3 Comportamento Hidrológico

Conforme mencionado, anteriormente, a disponibilidade de dados, fluviométricos e pluviométricos, na baía da Ilha Grande é pequena. A Figura 3.7 apresenta de forma sucinta essa condição. É possível verificar que a bacia do rio Mambucaba dispõe da melhor condição de dados de chuva e vazão ao mesmo tempo e, por isso, foi selecionada para aplicação do modelo hidrológico. Os dados utilizados com esse fim, foram os oriundos dos postos

pluviométricos de Fazenda das Garrafas e Vila Perequê e o posto fluviométrico de Fazenda Fortaleza.

Nos estudos do GRHIP (2006) para a baía da Ilha Grande, foi observado, a partir da análise das séries históricas de vazões e das relações cota-descarga para os postos fluviométricos de interesse, algum tipo de inconsistência. Assim, foi desenvolvido um estudo de revisão das séries de vazão, compreendendo a análise dos traçados das curvas-chave e do comportamento das cotas fluviométricas. Foi priorizada a revisão das séries a partir de 1974, levando-se em conta a questão da homogeneidade das séries e o fato de não se dispor de perfis de seção transversal do período mais antigo.

No âmbito da presente dissertação foi realizada uma revisão no ajuste das curvas-chave para os postos da baía da Ilha Grande, que também foi adotada no estudo do GRHIP. Entre elas, a curva-chave do posto Fazenda Fortaleza recebeu especial atenção, pois foi utilizada para gerar a série de vazões empregada na modelagem hidrológica. A análise da qualidade das medições de descarga disponíveis e das curvas-chave adotadas anteriormente foi feita com base em gráficos das relações cota-descarga, cota-área, cota-velocidade e cota-largura observadas nas medições.

No ajuste das equações das novas curvas-chave, foram utilizadas sistematicamente curvas potenciais, em detrimento das polinomiais e outras, pois as curvas potenciais resultam em funções mais próximas das leis hidráulicas que regem as relações cota-descarga.

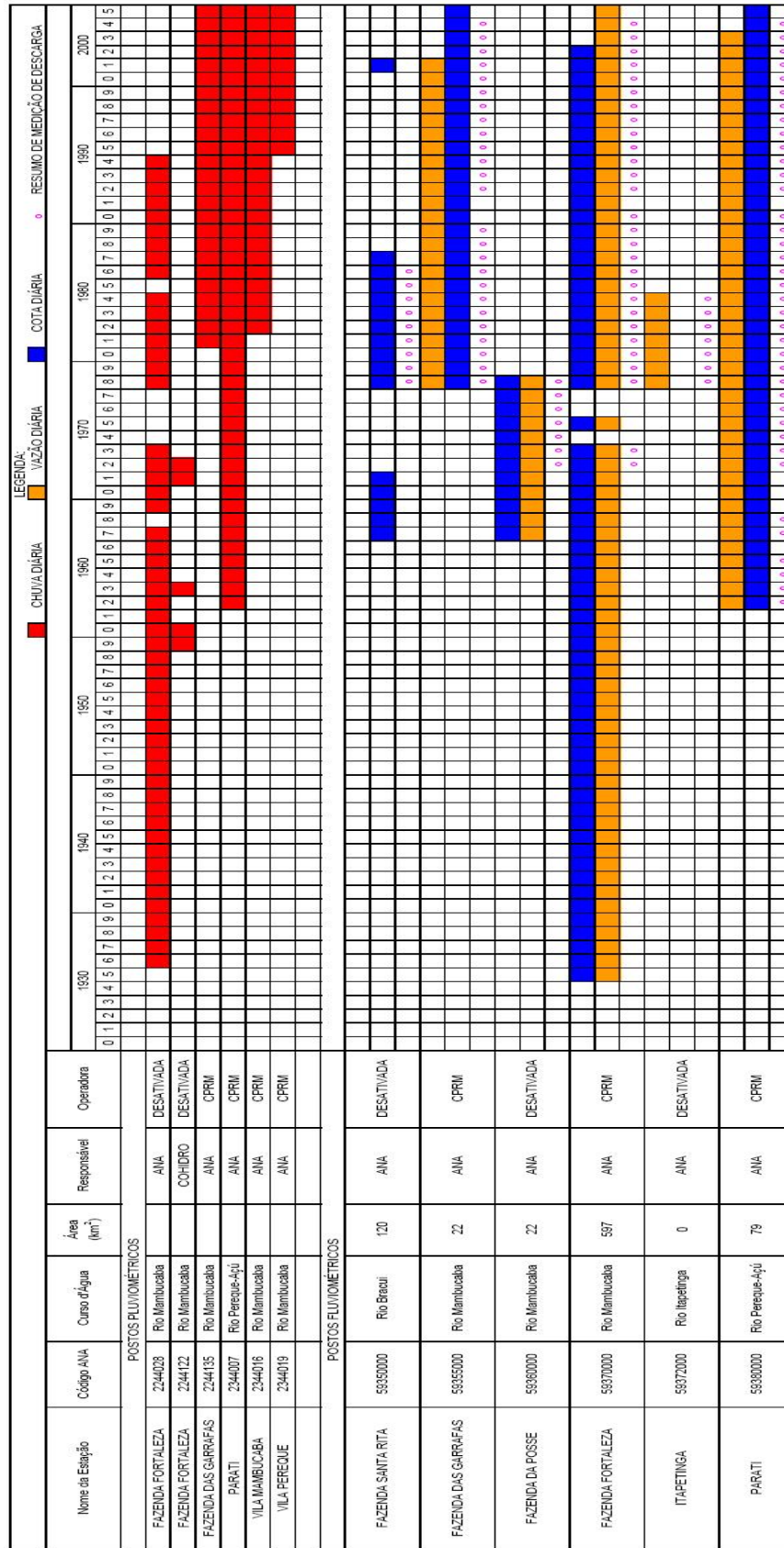


Figura 3.7: Disponibilidade de Dados Pluviométricos e Fluviométricos na Baía da Ilha Grande

A análise das medições de descarga do posto Fazenda Fortaleza indicou duas mudanças na relação cota x descarga, possivelmente decorrentes de deslocamento da seção de medição ou de processo de alteração da calha fluvial. Foram ajustadas duas equações, sendo que a primeira volta a ser válida no período mais recente, isto é, a equação ajustada para o período 1972 a 1980 mostrou-se válida também para o período mais recente, de 2001 a 2004. As equações ajustadas, onde Q é a vazão em m^3/s e LR a leitura de régua em m , foram as seguintes:

- curva 1: $Q = 56,7984 (LR - 0,24)^{1,6636}$, válida para os períodos de 08/12/72 a 13/02/81 e de 23/10/01 a 07/12/04;
- curva 2: $Q = 62,3331 (LR - 0,20)^{1,6036}$, válida para o período de 14/02/81 a 19/07/01.

A Figura 3.8 a seguir apresenta os resultados das medições de descarga e as curvas-chave ajustadas para o posto Fazenda Fortaleza.

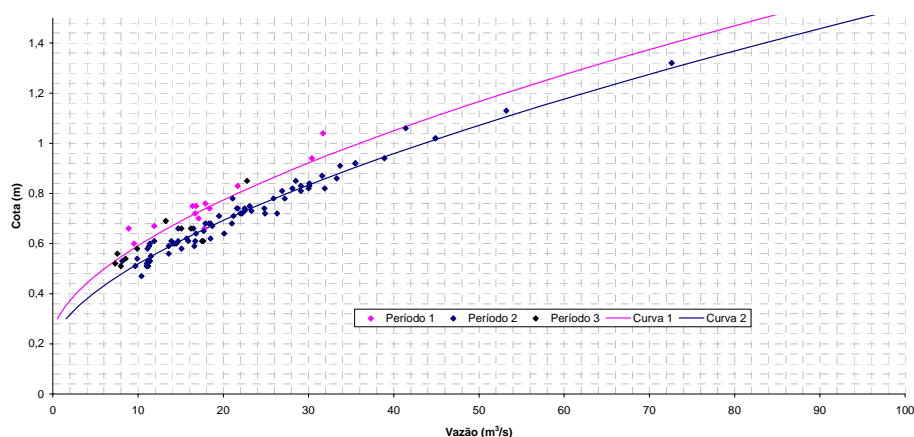


Figura 3.8: Curvas-chave do rio Mambucaba em Fazenda Fortaleza

As curvas-chave precisaram ser extrapoladas para estimar faixas de vazões máximas e mínimas observadas, mas não medidas. A extrapolação foi realizada pela extensão das equações ajustadas. Os trechos de extrapolação para valores mínimos foram curtos, mas quanto aos valores máximos, os trechos extrapolados foram longos.

A Figura 3.9 apresenta os valores médios, máximos e mínimos da série de vazões médias mensais registradas em Fazenda Fortaleza, no período 1935 a 2004. Pode-se observar uma grande variação das vazões mensais, principalmente no verão. A vazão média observada nesse período ficou em torno de $24,7 m^3/s$. As vazões médias mensais variaram entre $7,4 m^3/s$, em outubro de 2002, e $139 m^3/s$, em fevereiro de 1967. A vazão média diária no verão de 1967 chegou a aproximadamente $450 m^3/s$, em fevereiro. A partir das precipitações na estação

de Angra dos Reis, comentada anteriormente, e as vazões em Fazenda Fortaleza, constata-se o caráter excepcionalmente úmido do verão de 1967 nessa região.

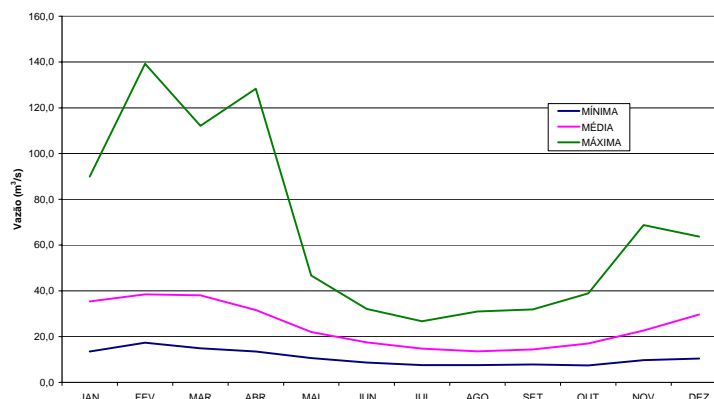


Figura 3.9: Vazões Médias Mensais do Rio Mambucaba em Fazenda Fortaleza (1935-2004)

Com base na análise de consistência das leituras de réguas e do estudo das curvas-chave do posto Fazenda Fortaleza, foram selecionados os períodos para calibração e validação do modelo TOPMODEL, que se concentraram no período de 1998 a 2001, no qual é válida a curva dois. A curva-chave desse período foi definida com mais medições e tem uma faixa menor de extrapolação.

O tempo de concentração, como parâmetro hidrológico invariável, pode ser definido como o tempo necessário para uma gota d'água caminhar superficialmente do ponto mais distante (em percurso hidráulico) da bacia até o seu exutório (Silveira, 2005).

Apesar do tempo de concentração ser uma das respostas da bacia hidrográfica mais utilizadas em estudos e projetos envolvendo eventos chuvosos, existe pouca informação sobre a adequação das diversas fórmulas empíricas disponíveis. Silveira (2005) avaliou o erro de 23 fórmulas de tempo de concentração, inclusive aquelas mais encontradas e utilizadas nos trabalhos brasileiros, confrontando o desempenho obtido em aplicações a bacias urbanas e rurais.

Com intuito de caracterizar a bacia do rio Mambucaba até Fazenda Fortaleza (597 km²), no presente trabalho, o tempo de concentração foi estimado a partir de duas fórmulas recomendadas por Silveira (2005) para bacias rurais com área de drenagem inferior a 12.000 km². Utilizando a fórmula do *Corps of Engineers*, o tempo de concentração da bacia do rio Mambucaba foi estimado em 6,4 horas e pela fórmula da Onda Cinemática em 5,7 horas.

A estimativa do tempo de concentração em torno de 6 horas sugere que a bacia do rio Mambucaba deveria ter um monitoramento com registradores de níveis e de precipitação com intervalos horários ou menores. O registro dos eventos chuvosos e sua repercussão nas vazões ficam prejudicados, pois o monitoramento atual é diário. Além disso, pode-se esperar que essa inadequação na escala de tempo do registro hidrometeorológico resulte em dificuldades na modelagem hidrológica, devido a incertezas na representação da chuva e da vazão.

3.4.4 Solos

Com base em recente mapeamento atualizado pela Embrapa Solos, verifica-se que os solos da bacia do Mambucaba não apresentam grande variação. Da área de drenagem até o posto Fazenda Fortaleza, apresentam Cambissolos em diversas associações cerca de 560 km², o equivalente a 94% da área. O restante da bacia, apenas 6% da área, aproximadamente 37 km², apresentam Neossolos (unidades RLd e RYbd).

Existe de uma forte predominância de associações de Cambissolo Háplico Tb distrófico + Cambissolo Húmico Distrófico (unidades CXbd2, CXbd3, CXbd6, CXbd7, CXbd8), que abrangem 516 km², o equivalente a 87% da área da bacia do Mambucaba até Fazenda Fortaleza.

Dos Cambissolos, a área restante tem associações de Cambissolo Háplico Tb distrófico + Latossolo Vermelho-Amarelo Distrófico (unidades CXbd1, CXbd4, CXbd5), que cobrem 7% da área, cerca de 43 km².

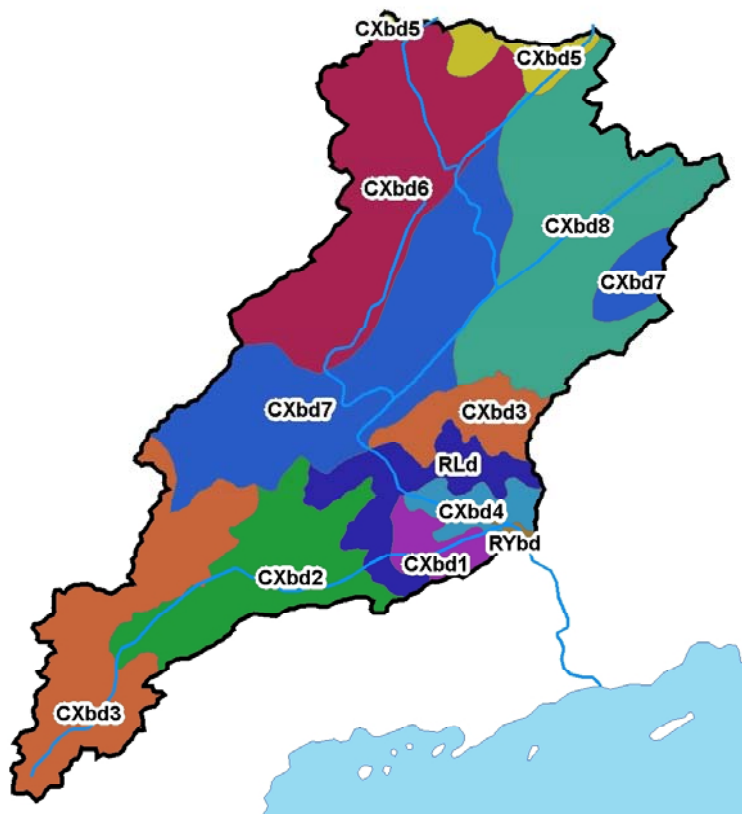
Com base no mapeamento de unidades de classe, pode-se dizer que a textura dos solos da bacia é média + argilosa em 68% da área, média em 27% e argilosa + média em 5% da área. A textura média e arenosa aparece em uma parcela inferior a 1% da área.

A profundidade dos solos, também foi avaliada, com base nas unidades de classes, tendo sido encontrado quatro tipos de associações de solos rasos (< 0,45m), poucos profundos, (> 0,45m e < 1,00m), profundos (> 1m e < 2m) e muito profundos (> 2m).

De modo predominante, em 87% da área da bacia, encontram-se associações de solos profundos + pouco profundos. O restante da área apresenta associações de solos profundos + muito profundos (7%) e rasos + pouco profundos (6%). O solo muito profundo aparece em uma parcela inferior a 1% da área.

A Figura 3.10 apresenta a distribuição das classes de solos da bacia do rio Mambucaba até Fazenda Fortaleza. Pode-se observar que as áreas com Latossolos Vermelho-Amarelo

estão localizadas no extremo norte da bacia, em altitudes muito altas, ou na parte mais baixa, onde os Neossolos também são encontrados.



Fonte: Mapa de Solos do Estado do Rio de Janeiro. Embrapa Solos. 2006.

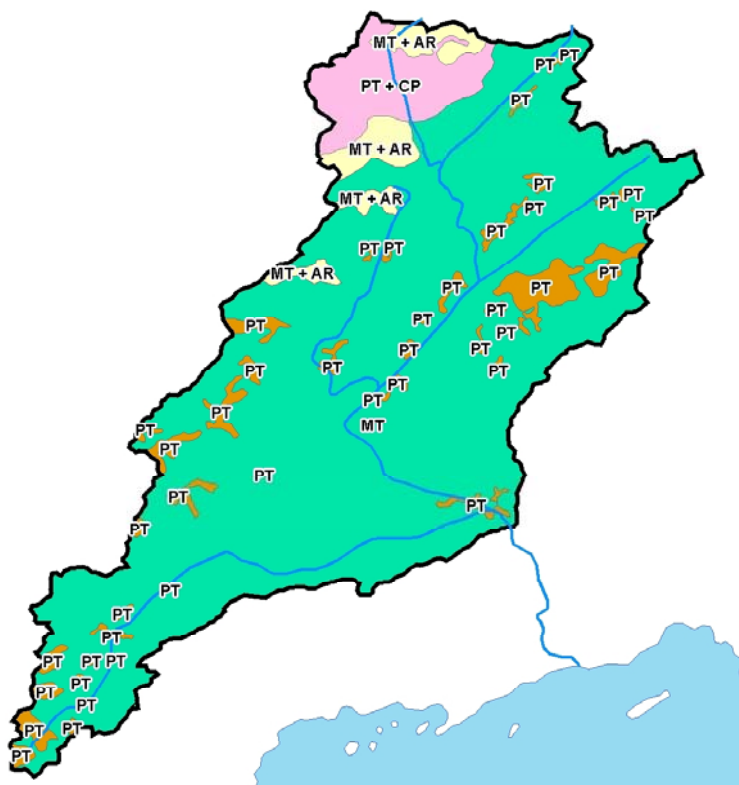
Figura 3.10: Classes de Solos da Bacia do Rio Mambucaba até Fazenda Fortaleza

3.4.5 Cobertura Vegetal e Uso do Solo

A bacia do rio Mambucaba tem grande parte de sua área com boa cobertura vegetal. Com base no mapeamento desenvolvido pela CPRM (2001), atualizado com auxílio de imagem de satélite, aproximadamente 496 km² estão cobertos por mata, o que equivale a 83% da área. Em mais 23 km², cerca de 4%, encontra-se uma associação de mata com área rural.

O solo é utilizado para pastagem em 41 km², cerca de 7% da área, sendo que no restante da bacia, 36 km² (6% da área), observa-se uma associação de pastagem + campo.

A Figura 3.11 a seguir apresenta a distribuição da cobertura vegetal e dos usos do solo na bacia do rio Mambucaba até Fazenda Fortaleza. Pode-se observar: o forte predomínio das áreas de mata (em verde); e a maior concentração das associações de pastagem + campo e de mata + área rural nas áreas com Latossolos Vermelho-Amarelo, localizadas no extremo norte da bacia.



Fonte: Uso e Cobertura das Terras do Rio de Janeiro. CPRM. 2001.

Figura 3.11: Cobertura Vegetal e Uso do Solo a Bacia do Rio Mambucaba até Faz. Fortaleza

CAPÍTULO 4. APLICAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO TOPMODEL

4.1 BASE CONCEITUAL DO MODELO TOPMODEL

4.1.1 Conceituação Geral

Segundo Mendes e Cirilo (2001), o modelo é uma representação ou abstração da realidade. Definitivamente, é mais simples que o mundo real, porém representa algumas de suas características importantes. Um modelo hidrológico busca representar o comportamento da bacia hidrográfica, que é um sistema. Acionado por um estímulo, a precipitação, e através de diversos fenômenos do ciclo hidrológico, a bacia transforma a precipitação em vazão.

Segundo Tucci (1998), algumas definições são importantes para melhor compreensão do sistema e do modelo que o representa:

- Fenômeno é um processo físico que produz alguma alteração de estado no sistema, como por exemplo, a precipitação, a evaporação ou a infiltração;
- Variável é um valor que descreve quantitativamente um fenômeno, variando no espaço e no tempo, como por exemplo, a precipitação diária ou a vazão horária;
- Parâmetro é um valor que caracteriza o sistema, tal como a área da bacia hidrográfica ou a rugosidade da seção transversal de um rio. O parâmetro também pode variar com o espaço e o tempo.

Em uma bacia hidrográfica, os fenômenos, variáveis e características (parâmetros) apresentam grande variabilidade espacial e temporal. Como a maioria dos modelos matemáticos utilizados em hidrologia aborda a variabilidade temporal, o uso do geoprocessamento na modelagem para melhor representar a variabilidade espacial pode resultar em vantagens.

O modelo TOPMODEL (*Topography Based Hydrological Model*) foi desenvolvido por Beven e Kirkby (1979) na Lancaster University, UK. É um modelo de transformação de chuva em vazão do tipo conceitual e semi-distribuído, que considera uma área variável de contribuição à formação de escoamento superficial. Conceitual porque as funções utilizadas na sua elaboração levam em consideração os processos físicos. Semi-distribuído porque a bacia é subdividida em elementos que são considerados homogêneos quanto às propriedades avaliadas, representando melhor a variabilidade espacial do sistema físico. A área de contribuição é variável porque os fatores que determinam o surgimento do escoamento

superficial são representados pela topografia local do terreno e por uma lei exponencial que relaciona a transmissividade com a profundidade da superfície de saturação do solo.

Segundo seus próprios autores, o TOPMODEL não é um pacote de modelagem hidrológica. Ele é mais um conjunto de ferramentas conceituais que pode ser usado para reproduzir o comportamento hidrológico de bacias hidrográficas em um caminho distribuído ou semi-distribuído, em particular a dinâmica das áreas de contribuição superficiais ou sub-superficiais, devendo ser adaptado em cada caso para representar as condições locais de funcionamento de uma bacia (Beven et al, 1995).

No decorrer dos anos, o TOPMODEL vem recebendo várias contribuições e sofrendo adaptações, de modo que atualmente pode-se falar em uma família de modelos, que seguem a filosofia do TOPMODEL clássico, mas cada versão foi adaptada para as necessidades e os objetivos específicos da modelagem.

Os principais atrativos na aplicação do modelo TOPMODEL estão relacionados ao pequeno número de parâmetros do modelo associado a uma razoável conceituação física. A topografia é considerada como participante do processo de formação do escoamento superficial através do índice topográfico, de modo que a bacia hidrográfica é representada no modelo através de uma função de distribuição do índice topográfico. Em outras palavras, a bacia é considerada como composta por sub-bacias homogêneas, que correspondem às classes de índice topográfico adotadas.

O modelo TOPMODEL fundamenta-se em 4 hipóteses básicas. A primeira hipótese é que a dinâmica da zona saturada do solo pode ser obtida por sucessivas representações de estado uniformes, isto é, em um determinado intervalo de tempo, o fluxo através do solo é praticamente uniforme.

A segunda hipótese é que o gradiente hidráulico da zona saturada do solo pode ser aproximado pela declividade da topografia em um determinado local, representada por $tg\beta_i$.

Essas duas hipóteses conduzem a relações simples entre o armazenamento de água na bacia e os níveis locais do lençol freático, que são representadas principalmente pelo índice topográfico proposto por Kirkby (1975):

$$topindex_i = \ln \frac{a_i}{tg\beta_i} \quad (1)$$

onde

a_i = área de drenagem específica por unidade de contorno associada ao ponto i (m)

$tg\beta_i$ = declividade da topografia em um determinado local i .

O índice topográfico representa a tendência de um determinado ponto da bacia desenvolver condições saturadas, caracterizando também a similaridade hidrológica, pois na conceituação do modelo todos os pontos com o mesmo valor de índice topográfico apresentam o mesmo comportamento hidrológico.

A terceira hipótese é que a transmissividade do solo varia com a profundidade da superfície de saturação ou, em outras palavras, com o déficit de armazenamento da água no solo, de uma forma aproximadamente exponencial, conforme a seguinte equação (2):

$$T = T_0 e^{-\frac{S}{m}} \quad (2)$$

onde

T = transmissividade do solo em determinado local (m^2h^{-1})

T_0 = transmissividade quando o solo está saturado à superfície (m^2h^{-1})

S = déficit de armazenamento local (m)

m = parâmetro do modelo que representa a altura efetiva do perfil do solo (m).

A transmissividade pode ser expressa pelo produto da condutividade hidráulica pela espessura da parte saturada do solo. A condutividade hidráulica, por sua vez, é uma função das propriedades do meio poroso e das características do fluido em estudo. Quanto mais permeável o material geológico, maior o valor da condutividade hidráulica (Cleary, 1989).

Beven (1984; Mine e Clarke, 1996) obteve dados sugerindo que um declínio exponencial na condutividade (vertical) do solo com a profundidade é adequado para descrever mudanças verticais nas propriedades hidráulicas de uma vasta gama de solos.

Posteriormente, algumas abordagens tentaram relaxar o pressuposto do TOPMODEL de decaimento exponencial para a bacia. Para algumas regiões e tipos de solo, outras funções representariam melhor a relação entre a transmissividade e o déficit hídrico no solo, havendo formulações alternativas com equações potenciais de primeira e segunda ordem, que representam relações do tipo linear e parabólico (Franchini et al, 1996; Kirkby, 1997).

A equação (2) também pode ser escrita da seguinte forma:

$$T = T_0 e^{-fz_i} \quad (3)$$

onde

z_i = profundidade da lâmina de água ou superfície de saturação em relação ao nível do terreno no ponto i (m)

f = parâmetro de escala (m^{-1}).

Os parâmetros f e m estão relacionados da seguinte forma:

$$f = \frac{\Delta\theta_i}{m} \quad (4)$$

onde

$\Delta\theta_i$ = variação da umidade do solo na zona não saturada devido à drenagem por gravidade.

Segundo Mine e Clarke (1996), a interpretação física do parâmetro m é que ele atua como controlador da profundidade efetiva do perfil de solo. Um grande valor de m efetivamente aumenta a profundidade ativa do perfil de solo. Como essa atuação ocorre de forma interativa com o parâmetro T_o , que define a transmissividade do perfil do solo quando saturado à superfície, um pequeno valor de m , especialmente se acoplado a um T_o relativamente alto, sugere um solo efetivo raso, mas com um profundo decaimento exponencial.

A partir da segunda hipótese, de que o gradiente hidráulico da zona saturada do solo pode ser considerado paralelo à superfície do terreno em um determinado local, o fluxo subsuperficial pode ser descrito pela seguinte equação:

$$q_i = T_o e^{-\frac{S_i}{m_i}} \text{tg}\beta_i \quad (5)$$

onde

q_i = fluxo subsuperficial por unidade de comprimento do contorno (m^2h^{-1}).

A quarta hipótese fundamental do modelo é que, dentro de um determinado intervalo de tempo, a taxa de recarga da zona saturada é espacialmente homogênea, e por ser obtida da seguinte forma:

$$q_i = ra_i \quad (6)$$

onde

r = taxa de recarga que alimenta a lâmina de água saturada (mh^{-1}).

Combinando as equações (5) e (6), e explicitando o valor da profundidade da superfície de saturação, obtém-se:

$$z_i = -\frac{1}{f} \ln \frac{ra_i}{T_o \text{tg}\beta_i} \quad (7)$$

Integrando a equação (7), pode-se obter o valor médio da profundidade da superfície da zona saturada sobre toda a área da bacia contribuinte:

$$\bar{z} = \frac{1}{A} \sum_i -\frac{1}{f} \ln \frac{ra_i}{T_0 \text{tg} \beta_i} \quad (8)$$

onde

A = área total da bacia (m^2)

\bar{z} = profundidade média da superfície de saturação na bacia (m).

Combinando as duas últimas equações e considerando que a recarga (r) é espacialmente uniforme, portanto constante, é possível eliminar esta variável. A diferença entre o valor médio na bacia e os valores locais, em cada ponto i , da profundidade da superfície de saturação pode ser expresso da seguinte forma:

$$\bar{z} - z_i = -\frac{1}{f} \left[\gamma - \ln \frac{a_i}{T_0 \text{tg} \beta_i} \right] \quad (9)$$

onde $\ln \frac{a_i}{T_0 \text{tg} \beta_i}$ é denominado por Beven como índice solo-topográfico e

$$\gamma = \frac{1}{A} \sum_i \left[\ln \frac{a_i}{T_0 \text{tg} \beta_i} \right] \quad (10)$$

A transmissividade média pode ser obtida por:

$$\ln T_e = \frac{1}{A} \sum_i \ln T_o \quad (11)$$

O valor médio do índice topográfico para toda a bacia λ pode ser definido como:

$$\lambda = \frac{1}{A} \sum_i \ln \left(\frac{a_i}{\text{tg} \beta_i} \right) \quad (12)$$

A equação (9) pode ser reorganizada da seguinte forma:

$$f(\bar{z} - z_i) = \left[\ln \frac{a_i}{\text{tg} \beta_i} - \lambda \right] - [\ln T_o - \ln T_e] \quad (13)$$

Essa equação (13) expressa a relação entre a profundidade média do lençol freático e a profundidade em um determinado local i , que é calculada em função da diferença entre o índice topográfico nesse local e seu valor médio descontada da diferença entre o logaritmo da transmissividade no local e seu valor médio espacial. Reescrevendo a equação (13) em termos do déficit de armazenamento da zona saturada:

$$S_i = \bar{S} + \left[\lambda - \ln \frac{a_i}{\text{tg} \beta_i} \right] m \quad (14)$$

onde

S_i = déficit de armazenamento da zona saturada

\bar{S} = déficit médio de armazenamento da zona saturada na bacia.

Considerando que a profundidade média \bar{z} da zona saturada e o índice topográfico médio λ são valores constantes para toda a bacia, pode-se notar na Equação (13) que z_i , profundidade da superfície de saturação no ponto i , é função linear do índice topográfico. Desse modo, verifica-se que todos os pontos da bacia que apresentam o mesmo índice topográfico possuem também comportamento hidrológico semelhante, o que é denominado de *similaridade hidrológica*.

No modelo TOPMODEL clássico, a partir dos dados de índice topográfico, constrói-se a função índice topográfico *versus* percentual da área da bacia. Com isso, a área é dividida em determinado um número de classes de índice topográfico, e os elementos da bacia que pertencem à mesma classe de índice topográfico são considerados pelo modelo em conjunto, de modo que todas as variáveis são calculadas para cada uma das classes definidas, e não para todos os pontos da bacia, simplificando a solução do problema.

No modelo, o escoamento superficial é gerado apenas sobre uma parcela da área total da bacia hidrográfica, que fica saturada durante os eventos chuvosos, sendo que a produção do escoamento ocorre quando a precipitação atinge essas áreas ou quando o fluxo superficial retorna à superfície (Xavier, 2002).

As áreas de contribuição ao escoamento são variáveis, já que se expandem e se contraem sobre diferentes partes da bacia, em função da saturação do solo. Com isso, o TOPMODEL pode ser definido como um modelo baseado no conceito de área de contribuição variável, cujos principais fatores de formação do escoamento são representados pela topografia da bacia hidrográfica e pela suposição do decréscimo exponencial da condutividade hidráulica saturada ao longo do perfil do solo (Rennó, 2003).

4.1.2 Os Armazenamentos da Água no Modelo

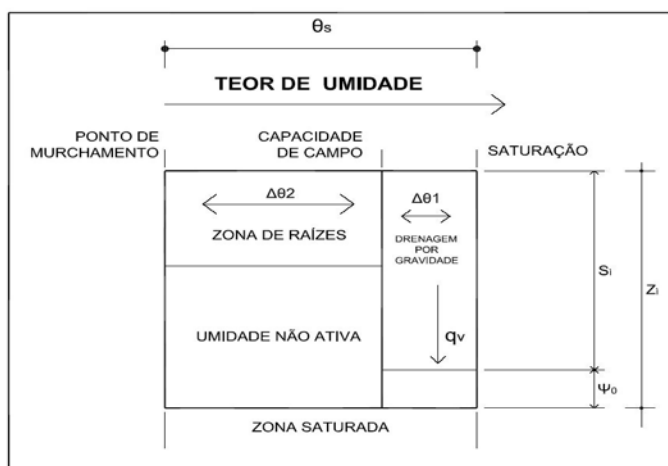
Na primeira versão do TOPMODEL, Beven & Kirkby (1979) usaram três armazenamentos: interceptação ou depressões; infiltração; e zona saturada. A propagação de toda a água infiltrada imediatamente para a zona saturada gerou uma superestimativa da descarga, que eles atribuíram a uma subestimativa das perdas por evaporação. Este problema retratou a inadequação do TOPMODEL em modelar o fluxo não saturado na vertical, entre o reservatório de infiltração e a lâmina de água. Então, foi introduzida no modelo a noção de

capacidade de campo, representando um valor de infiltração que precisaria ser excedido antes de ocorrer o fluxo para a zona saturada. A água, impedida de entrar na zona saturada, permaneceria disponível para evapotranspiração, reduzindo a superestimativa do modelo em escoamentos após períodos secos (Beven et al, 1984; Mine & Clarke, 1996).

Em outras versões, métodos físicos mais explícitos foram adotados, contudo esses métodos introduziam também uma grande quantidade de parâmetros, dificultando a calibração.

Na versão clássica do TOPMODEL adotada nessa dissertação, o armazenamento de água no solo é representado por dois reservatórios, correspondentes às zonas saturada e não saturada do solo.

A Figura 4.1, a seguir, apresenta uma representação esquemática dos elementos de armazenamento vertical no modelo, para o caso de saturação expressa em termos de profundidade da lâmina de água.



Fonte: (Mine & Clarke; 1996)

Figura 4.1: Armazenamentos de água do solo no TOPMODEL (Beven et al, 1995)

A noção de uma zona de água do solo não ativa reflete o conceito de capacidade de campo. O fluxo vertical da zona de raízes para a lâmina de água pode ocorrer na zona de drenagem por gravidade somente quando a capacidade de campo é satisfeita. A conversão entre déficit de armazenamento devido à drenagem e altura da lâmina de água assume que a drenagem por gravidade rápida afeta somente os poros maiores, abaixo da capacidade de campo, e que a diferença em armazenamento entre a saturação e a capacidade de campo não se altera com a profundidade. Isso resulta na seguinte relação:

$$S_i = (\theta_s - \theta_{fc})(z_i - \psi_o)$$

$$S_i = \Delta\theta_1(z_i - \psi_o) \quad (15)$$

onde

S_i = déficit de armazenamento da drenagem por gravidade ou déficit de armazenamento da zona saturada (m)

ψ_o = profundidade efetiva da franja capilar (m)

θ_s = umidade de saturação

θ_{fc} = umidade da capacidade de campo

$\Delta\theta_1$ = porosidade drenável efetiva.

A vazão de percolação (ou fluxo vertical) em um determinado local i pode ser obtida, com base no fluxo de base de Darcy da zona não saturada, pela seguinte expressão:

$$q_v = \alpha K_o e^{-fz_i} \quad (16)$$

onde

α = parâmetro que representa o gradiente hidráulico vertical efetivo

K_o = condutividade saturada à superfície.

Considerando o valor de α próximo da unidade, e assumindo que o fluxo vertical é igual à condutividade hidráulica saturada à lâmina de água, pode-se eliminá-lo como parâmetro.

O TOPMODEL segue práticas usualmente adotadas no cálculo da evapotranspiração real (E_a) como uma função da evaporação potencial (E_p) e da umidade na zona das raízes, quando E_a não pode ser diretamente medido. A evapotranspiração é calculada pela expressão:

$$E_a = E_p \left(1 - \frac{S_{rz}}{S_{rmax}} \right) \quad (17)$$

onde

S_{rz} = déficit de armazenamento da zona radicular

S_{rmax} = déficit de armazenamento máximo da zona radicular.

A zona radicular corresponde, no modelo, a um reservatório de interceptação, cuja função fundamental é representar a fração do volume precipitado que estará disponível para a evapotranspiração, englobando tanto a interceptação propriamente dita como o armazenamento na zona radicular (Franchini et al., 1996; Xavier, 2002).

No TOPMODEL clássico, a evapotranspiração potencial e o parâmetro S_{rmax} são constantes para toda a bacia. Os déficits S_{rz} são calculados para cada classe de índice topográfico. Se uma profundidade efetiva da zona de raízes z_{rz} pode ser assumida, S_{rmax} pode ser calculada a partir da seguinte equação:

$$S_{rmax} = z_{rz} (\theta_{fc} - \theta_{wp}) = z_{rz} (\Delta\theta_2) \quad (18)$$

onde

θ_{wp} = umidade no ponto de murchamento

S_{rz} = déficit de armazenamento da zona radicular

S_{rmax} = déficit de armazenamento máximo da zona radicular.

Se o fluxo de água entrando na lâmina de água em determinado local é q_v , para obter a média do balanço de água é necessário somar todas as recargas. Considerando Q_v como a recarga total para o aquífero, então,

$$Q_v = \sum_i q_{v_i} A_i \quad (19)$$

onde

A_i = área associada com a classe i do índice topográfico como uma fração da área total da bacia.

O reservatório correspondente à zona saturada do solo é deplecionado através de uma taxa Q_b , que constitui a vazão de base do hidrograma. Essa vazão pode ser calculada de forma distribuída pela soma do fluxo subsuperficial junto a cada um dos r trechos do canal de comprimento L por onde o fluxo será propagado, conforme a equação:

$$Q_b = \sum_j^r L_j (T_0 t g \beta_i) e^{-fz_i} \quad (20)$$

onde

L_j = comprimento do canal j por onde o fluxo é propagado.

Substituindo z_j pela Equação (9) e reorganizando a Equação (20), obtém-se:

$$Q_b = \sum_{j=1}^r L_j a_j e^{-\gamma} e^{-f\bar{z}} \quad (21)$$

Como a_i representa a área de contribuição por unidade de contorno, tem-se que

$$\sum_{j=1}^r L_j a_j = A \quad (22)$$

onde

A = área total da bacia (m^2).

Substituindo na Equação (16) resulta em

$$Q_b = Ae^{-\gamma} e^{-f\bar{z}} = AT_o e^{-\lambda} e^{-\frac{S}{m}} \quad (23)$$

considerando a transmissividade T_o constante para a bacia. Esta equação permite determinar a vazão do escoamento de base em termos da profundidade média da superfície de saturação na bacia (\bar{z}).

$$Q_b = Q_o e^{-f\bar{z}} \quad (24)$$

onde

Q_o = descarga de base quando \bar{z} ou \bar{S} são iguais a zero.

O déficit de armazenamento médio na bacia, antes de cada intervalo de tempo, é atualizado pela subtração da recarga da zona não saturada e adição da vazão de base calculada no intervalo de tempo anterior, ou seja,

$$\bar{z}_t = \bar{z}_{t-1} + \Delta\theta_1 [Q_{b_{t-1}} - Q_{v_{t-1}}] \quad (25)$$

O valor do armazenamento médio da bacia no primeiro intervalo de tempo pode ser obtido com base na equação acima se a vazão de saída é conhecida e igual à vazão de base.

4.1.3 Escoamento em canal

O escoamento na bacia é propagado através de uma função distância-resposta. O tempo de um determinado ponto até a saída da bacia é obtido por:

$$t = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{vtg\beta_i} \quad (26)$$

onde

x_i = comprimento do segmento i de um caminho de fluxo com n segmentos

$tg\beta_i$ = declividade do segmento i

v = parâmetro de velocidade considerado constante (m/h).

A equação (26) permite derivar um único histograma do tempo de resposta de uma bacia hidrográfica para uma área de contribuição do escoamento.

4.2 APLICAÇÃO DO MODELO TOPMODEL EM BACIAS BRASILEIRAS

Desde sua elaboração, em 1979 (Beven et al, 1979), o modelo TOPMODEL foi aplicado em bacias hidrográficas localizadas em vários estados brasileiros: Distrito Federal (Varella, 2000); Minas Gerais (Machado, 2000; Maia, 2001); Paraná (Mine e Clarke, 1996; Zákia, 1998; Santos, 2001); Pernambuco (Araújo et al, 2005); Rio de Janeiro (Xavier, 2002); e São Paulo (Schuler, 2000; Moraes et al, 2003; Rennó et al., 2003; Ferreira, 2004; Ranzini et al, 2004).

De maneira geral, os modelos chuva-vazão têm sido muito aplicados no Brasil, nas últimas décadas, principalmente em questões relacionadas com a engenharia hidrológica e hidráulica. O planejamento, projeto e dimensionamento das usinas hidrelétricas, assim como a operação do Sistema Interligado Nacional – SIN sempre impulsionaram a pesquisa e a utilização de modelos chuva-vazão no Brasil. Da mesma forma, nos estudos e projetos relacionados com drenagem pluvial e contenção de inundações esses modelos têm sido muito utilizados. Essas aplicações na engenharia frequentemente têm como objetivo a extensão das séries históricas de vazões registradas e/ou a simulação de hidrogramas associados a eventos extremos. A utilização dos modelos estava usualmente associada ao dimensionamento e operação de sistemas hidráulicos, de modo que a pesquisa ficou concentrada nas diversas instituições de ensino ligadas à engenharia civil ou de pesquisa do setor elétrico.

De modo diverso, as aplicações recentes do modelo TOPMODEL no Brasil apresentam maior variedade no tipo de instituições envolvidas e nos objetivos dos estudos. Ferreira (2004) aplicou o modelo em sua pesquisa de doutorado na Faculdade de Engenharia Agrícola de Campinas. Ranzini et al (2004) desenvolveram seu estudo com o modelo no Instituto Florestal da Secretaria de Meio Ambiente do Estado de São Paulo. Moraes et al (2003) e Schuler et al (2000) utilizaram o modelo em trabalhos do Centro de Energia Nuclear na Agricultura – CENA da USP. Rennó & Soares (2003) utilizaram o TOPMODEL em um estudo do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE.

O amplo espectro da formação dos pesquisadores interessados no TOPMODEL deve estar relacionado com as próprias características do modelo. Por ser um modelo conceitual, leva em consideração os processos físicos, sendo que o relevo e as características dos solos têm grande importância em sua formulação. Apresenta também boa perspectiva para permitir a previsão dos impactos decorrentes da alteração da cobertura vegetal e do uso do solo no comportamento hidrológico das bacias hidrográficas, abrangendo com isso diversos

problemas ambientais. Algumas dessas experiências estão relatadas, de forma resumida, a seguir.

Mine & Clarke (1996) aplicaram o TOPMODEL na bacia hidrográfica do rio Belém na estação fluviométrica de Prado Velho, no Estado do Paraná. Até aquela data, o maior número de aplicações do modelo havia sido em pequenas bacias rurais, com áreas inferiores a 10 km², e bem monitoradas. O objetivo do trabalho foi explorar o potencial do modelo e verificar a viabilidade de futuras aplicações, adaptando-o às condições brasileiras caracterizadas pela escassez de informações.

A área de drenagem do rio Belém em Prado Velho é 42 km². As altitudes variam de 1.010m na cabeceira a 878m no exutório. Nas cabeceiras, cerca de 3,53 km² correspondem a uma área rural, sendo o restante totalmente urbanizado, o que caracteriza essa bacia como de resposta muito rápida. O modelo foi testado em oito enchentes ocorridas em 1986. A principal razão de terem sido utilizados períodos curtos de tempo foi o fato de não estarem disponíveis dados interpretados de linigramas e nem de pluviogramas. Mine & Clarke consideraram, no entanto, que ao contrário do que acontece com modelos conceituais chuva-vazão, nos modelos com uma base física, como o caso do TOPMODEL, é possível garantir uma estimativa adequada de parâmetros, mesmo para períodos curtos.

A área em estudo foi subdividida em duas sub-bacias: rural (3,53 km²) e urbana (38,47 km²). O programa GRIDATB foi usado para obter as distribuições do índice topográfico para as duas sub-bacias, tendo sido utilizado um mapa da bacia na escala 1:10.000 com curvas de nível de 5m em 5m. Devido à ausência de dados digitalizados de altimetria, foi usada uma malha com dimensões de 250m x 250m, para determinação da matriz de elevações fornecida ao programa, apesar da recomendação de Beven et al (1994) para a resolução ser 50m ou menor. Mine & Clarke ressaltaram, no entanto, que a influência dessa questão pode ser significativa para áreas com declividades acentuadas e canais de rios menores que o tamanho da malha.

Para medida da eficiência do modelo foi utilizado o coeficiente de Nash e Sutcliffe, calculado pela seguinte equação:

$$E = 1 - \frac{\hat{\sigma}_e}{\hat{\sigma}_0} \quad (27)$$

onde

$\hat{\sigma}_e$ = variância dos resíduos

$\hat{\sigma}_0$ = variância das vazões observadas.

Mine & Clarke concluíram que, em termos médios, a eficiência do modelo foi 0,54, bem abaixo do recomendado na literatura (0,70), mas para as enchentes maiores atingiu eficiências superiores a 0,80, colocando o modelo como uma direção promissora na modelagem do escoamento. Dos oito eventos testados, três apresentaram um alto coeficiente de eficiência ($E > 0,81$) com picos coincidentes. Os piores resultados foram para as enchentes menores. Segundo os autores, o ajuste, em termos globais, não foi considerado satisfatório para o rio Belém, tendo uma série de fatores envolvidos:

- baixa resolução dos dados de elevação usados para a derivação da distribuição do índice topográfico;
- grande área de drenagem e impermeabilização;
- área drenada rural muito pequena em relação à área inteiramente urbanizada;
- modelo calibrado com base em apenas um evento;
- baixa correlação entre chuva e vazão de alguns períodos analisados;
- disponibilidade de evapotranspiração potencial só na escala mensal;
- dificuldades na estimativa do parâmetro m devido à escassez de dados e ao despejo de esgoto;
- discrepâncias associadas à concepção do modelo, pelo fato do parâmetro m , que representa a altura efetiva do perfil do solo, se manter constante para uma vasta gama de níveis armazenamento.

O TOPMODEL foi aplicado por Varella & Campana (2000) na bacia do rio Descoberto, a montante do lago de mesmo nome. A área de drenagem da bacia tem 114 km², localizada no Distrito Federal e uma pequena parte no Estado de Goiás. A estação fluviométrica Descoberto Montante, localizada no exutório da bacia, dispõe de linígrafo e forneceu os dados de vazão. A estação pluviográfica Brazilândia, localizada dentro da área da bacia, forneceu os dados de chuva de 1995. Os dados pluviográficos de 1988 foram fornecidos pela estação Descoberto Jusante, situada em local próximo à bacia. A versão do modelo utilizada foi a 94.01, com 10 parâmetros a serem fornecidos.

O estudo concentra-se principalmente na análise da influência da resolução do modelo numérico do terreno sobre o desempenho do modelo. Na análise da topografia da bacia, foram utilizados mapas topográficos em formato digital, que distribuídos espacialmente por Kriging produziram o modelo numérico de terreno. Foram elaborados sete modelos numéricos do terreno, com resoluções espaciais de 30, 60, 90, 120 150, 180 e 210m. Para o cálculo da distribuição dos valores do índice topográfico na bacia, foi utilizado o programa GRIDATB, que utiliza técnica de análise de modelo numérico do terreno, descrita por Quinn et al (1991).

Varella & Campana (2000) concluíram que o índice de eficiência de Nash-Sutcliffe, sugerido por Beven, mais do que um índice da qualidade global do ajuste, quantifica o desvio entre as vazões calculadas e observadas, representando a capacidade do modelo de reproduzir a forma do hidrograma. Nas diversas simulações realizadas, foram obtidos ajustes razoavelmente precisos em termos de volume, vazão e tempo de pico. No entanto, os valores de eficiência foram pequenos, indicando que o modelo não conseguiu reproduzir fielmente a forma do hidrograma. Por isso, concluíram que a aplicação desta versão do modelo na bacia do rio Descoberto seria mais apropriada para utilizações em estudos de enchentes, onde o interesse está na vazão e tempo de pico e no volume total.

Ressaltaram a importância da determinação dos valores dos parâmetros m e T_0 , para os quais o modelo apresentou maior sensibilidade, em particular T_0 , que depende da resolução espacial do modelo numérico do terreno. As maiores resoluções do MNT influenciam em menor grau o valor do parâmetro T_0 . Consideraram ainda como desejável que se trabalhe a bacia da forma mais distribuída possível, dividindo-a em sub-bacias que apresentem maior homogeneidade em termos de cobertura de solo e tirando-se maior proveito das técnicas de geoprocessamento.

Schuler et al (2000) aplicaram o TOPMODEL clássico nas cabeceiras do rio Corumbataí, um dos principais tributários do rio Piracicaba, município de Analândia, Estado de São Paulo. O objetivo do trabalho foi avaliar a representatividade física dos parâmetros do modelo e sua habilidade na descrição dos mecanismos de geração de vazão.

O modelo foi aplicado para uma sub-bacia de 59 km², tendo sua performance sido testada em períodos contínuos de 15 dias e em eventos isolados de chuva, cujas hidrógrafas produzidas tinham de 1 a 3 dias de duração. Os dados utilizados referiam-se às estações úmidas dos anos hidrológicos de 92/93 e 93/94.

Segundo Schuler et al (2000), a interpretação física do parâmetro m é que ele atua como controlador da profundidade efetiva do solo e, junto com a transmissividade saturada (T_0), determina a zona ativa do solo onde ocorre o escoamento subsuperficial. Quanto maior o valor de m , maior a espessura da camada do solo considerada como condutora para o regime subsuperficial e, quanto mais profundo for o solo, mais lentos tornam-se os processos de geração de vazão. Nos períodos em que o parâmetro mostrou sensibilidade, normalmente a grandeza dos valores aceitáveis para simular a vazão se aproximou da estimativa dos levantamentos pontuais de campo, não tendo relação com os valores obtidos pelo método da recessão. Além disso, o modelo mostrou sensibilidade a este parâmetro nas simulações dos períodos quinzenais, mas não nos eventos.

O parâmetro m pode não ser efetivo no modelo, caso a forma da recessão não seja hiperbólica, correspondente à equação de decaimento exponencial da transmissividade hidráulica utilizada no cálculo do escoamento lateral. Neste caso nenhum valor de m permitiria reconstituir as recessões corretamente (Schuler et al, 2000).

O parâmetro T_0 mostrou grande sensibilidade tanto para os períodos quanto para os eventos. Saulnier (1996; Schuler et al, 2000) ressalta que as medidas de campo supõem a isotropia dos solos, ao passo que o parâmetro refere-se à condutividade lateral que, em certos casos, chega a ser até 100 vezes maior que a vertical.

A superestimativa de T_0 poderia resultar em altos valores de escoamento lateral, com um rápido esvaziamento do reservatório de drenagem gravitacional, o que acarretaria em hidrógrafas com quedas abruptas (Durand et al, 1992; Schuler et al, 2000).

A sensibilidade ao parâmetro SR_{max} , definido como déficit máximo da zona radicular, foi presente tanto nos períodos quanto nos eventos, com valores médios bem próximos ao estimado pelo estudo de campo, o que indica a possibilidade de se fixar este parâmetro quando existem dados de porosidade do local.. Este parâmetro tem relação direta com a determinação da evapotranspiração real, que depleciona o armazenamento na zona das raízes quando a zona drenada por gravidade é exaurida.

O parâmetro SR_0 mostrou maior efetividade na simulação de eventos do que em períodos, porque em períodos maiores de tempo, o efeito do déficit inicial é compensado ao longo da simulação. Os resultados mostraram que, para eventos, a sensibilidade ao déficit inicial é, inclusive, maior que a sensibilidade ao SR_{max} (Schuler et al, 2000).

Moraes et al (2003) desenvolveram um outro estudo também nas cabeceiras do rio Corumbataí, com o objetivo principal de realizar medidas das propriedades físicas dos solos, necessárias à parametrização de modelos hidrológicos. Foram analisadas as seguintes grandezas: a condutividade hidráulica do solo saturado (K_0); o decaimento de K_0 com a profundidade, presumindo um ajuste exponencial; e valores de umidade com base no volume, obtidos através da curva de retenção de amostras indeformadas. O modelo TOPMODEL foi utilizado para comparar os valores dos parâmetros obtidos pela calibração com os valores medidos em campo.

Segundo os autores, os resultados obtidos mostraram a importância da realização de medidas de campo de algumas propriedades físicas dos solos na discussão qualitativa e na modelagem dos processos hidrológicos. O fator de decaimento (f) e a capacidade máxima de armazenamento (SR_{max}) apresentaram valores da mesma ordem de grandeza dos obtidos

através de calibração. Já a condutividade hidráulica do solo saturado (K_0) apresentou valores calibrados muito acima dos medidos. Este último é provavelmente superestimado pelo modelo para compensar a contribuição rápida através de caminhos preferenciais e macroporos e, ainda, devido a problemas numéricos provocados pela resolução dos mapas topográficos.

Posteriormente, mais uma outra aplicação do TOPMODEL foi realizada para a mesma sub-bacia do rio Corumbataí. Rennó & Soares (2003) utilizaram o índice topográfico para estimar a profundidade do lençol freático espacialmente distribuído na bacia, sendo que o conceito de lençol freático utilizado no trabalho refere-se à linha que separa as zonas de aeração e saturada. Os resultados indicaram uma boa relação entre o índice topográfico e as condições de saturação do solo. Os valores mais altos desse índice foram encontrados em elementos associados à rede de drenagem, enquanto que os baixos valores foram encontrados em regiões com declive mais acentuado. A utilização do índice topográfico na estimação da profundidade do lençol não foi satisfatória quando foram utilizadas estimativas para os parâmetros T_0 provenientes de medições de campo.

Xavier (2002) utilizou o TOPMODEL para analisar o impacto da incerteza causada pela representação da precipitação no modelo. Como parte do estudo, foi proposta uma metodologia de análise da incerteza através do método de Monte Carlo, baseada no método de estimação de incerteza Glue, tendo sido dado destaque à consideração dos campos de precipitação, e ao efeito de sua simplificação na resposta de um modelo do tipo chuva-vazão como o TOPMODEL.

O estudo foi desenvolvido numa sub-bacia do rio Iguaçu, com 253 km² de área de drenagem, que abrange os municípios de Belford Roxo, Duque de Caxias e Nova Iguaçu, no Estado do Rio de Janeiro. O rio Iguaçu desemboca na Baía de Guanabara, mas o trecho modelado se estendeu até um ponto pouco a montante da foz do rio Botas, seu principal afluente. O mapa de índice topográfico da bacia foi obtido a partir de um modelo numérico de terreno (MNT), com resolução de 25m.

Para cada classe de índice topográfico foram derivadas funções de distribuição da precipitação. Xavier (2002) confirmou que a representação imperfeita da precipitação em um modelo hidrológico constitui-se em uma considerável fonte de incerteza. Com base na análise de sensibilidade do modelo, realizada a partir dos resultados obtidos pela metodologia Glue, verificou ainda que o modelo apresenta grande sensibilidade ao parâmetro m . O resultado mais interessante foi a alteração da distribuição dos parâmetros aceitos à medida que diferentes campos de precipitação foram utilizados, efeito particularmente marcante para o parâmetro m .

Ferreira (2004) aplicou o modelo TOPMODEL numa sub-bacia do ribeirão dos Marins, localizada no município de Piracicaba (SP), com área de drenagem de 20 km² até a seção Monjolinho. O trabalho teve como objetivo simular o comportamento hidrológico das vazões de eventos chuvosos dessa bacia hidrográfica, que apresenta características típicas das áreas agrícolas da região da bacia do rio Piracicaba, do qual o ribeirão Marins é afluente. Na bacia, predominam os solos argissolos e 52% da área está ocupada pela cultura de cana-de-açúcar.

A simulação da vazão dos eventos de precipitação apresentou uma tendência, tanto no processo de calibração quanto na fase de validação, em subestimar as vazões máximas observadas e superestimar os volumes escoados. No entanto, Ferreira (2004) concluiu que, apesar disso, o modelo apresentou um bom desempenho na simulação dos eventos da bacia do ribeirão dos Marins.

Ranzini et al (2004) aplicaram o modelo a uma microbacia florestada de 56 ha, denominada bacia D, localizada na Serra do Mar, próximo à cidade de Cunha. Essa microbacia é monitorada pelo Laboratório de Hidrologia do Instituto Florestal do Estado de São Paulo, localizado no Parque Estadual da Serra do Mar, tendo sido usada para diversos estudos. O objetivo do trabalho envolvendo o TOPMODEL foi testar a validade das premissas do modelo e compreender melhor o funcionamento hidrológico da bacia.

A precipitação foi medida continuamente através de quatro pluviógrafos do tipo caçamba, dispostos em três clareiras ao longo do canal principal e o quarto no ponto de maior altitude da bacia. A precipitação na bacia D foi estimada pela média aritmética dos quatro pluviógrafos. Os níveis d'água foram medidos continuamente num linígrafo do tipo flutuador. A estação fluviométrica dispõe de um tanque de sedimentação e um canal trapezoidal, regulador do fluxo de água.

Segundo levantamento detalhado (Ranzini et al, 2004; Carvalho et al, 1990), os solos da bacia apresentam sete tipos e duas associações de Latossolo Vermelho-Amarelo. Os processos hidrológicos foram descritos em estudos anteriores (Fujeda et al, 1997; Cicco e Fujeda, 1992; Cicco et al, 1986/1988). Cerca de 18% da precipitação média anual de 2200mm (1983-1998) é interceptada pela floresta e retorna diretamente à atmosfera. A maior parte (82%) alcança o solo, infiltrando-se e alimentando os escoamentos subsuperficial e de base, sendo que 12% voltam à atmosfera via transpiração. O escoamento superficial é raro, alcançando somente 0,6% da precipitação anual. O escoamento direto é composto por 5% proveniente da área variável de afluição adjacente ao curso d'água e por 6% do escoamento subsuperficial, perfazendo 11% da precipitação anual. Cerca de 59% da precipitação anual é armazenada no

solo e flui via escoamento de base ao longo do ano. Portanto, o deflúvio é composto dos escoamentos direto e de base, alcançando 70% da precipitação anual.

Algumas das principais conclusões da experimentação foram:

- o modelo mostrou-se sensível aos parâmetros, sinalizando que a parte física do modelo refletiu os processos reais da bacia D;
- a eficiência do modelo dependeu não somente do volume precipitado, mas também da intensidade e distribuição da chuva;
- a simulação para períodos longos apresentou eficiências muito baixas. Uma das razões seria a participação preponderante do escoamento superficial saturado no escoamento direto, conforme observado por outros autores em trabalhos semelhantes;
- a simulação de eventos isolados mostrou uma melhor eficiência do modelo. Para um período de dois anos hídricos foram simulados 35 eventos, dos quais 7 apresentaram uma eficiência de Nash e Sutcliffe superior a 0,7.

Na modelagem hidrológica da bacia do riacho Gameleira, afluente do rio Tapacurá, localizado no Estado de Pernambuco, Araújo et al (2005) utilizaram uma versão simplificada do modelo TOPMODEL, desenvolvida pelo *Laboratoire d'études des Transferts en Hydrologie et en Environnement* – LTHE, na França, denominada TOPSIMPL (*TOPmodel SIMPLifié*).

A versão simplificada possui apenas 4 parâmetros para serem calibrados: a condutividade saturada na superfície do solo (K_0); a taxa de decréscimo da condutividade com o déficit (m); a profundidade do reservatório radicular (SR_{max}); e a componente que engloba evapotranspiração e interceptação ($Inter$).

A área de drenagem total do riacho Gameleira é 16,5 km². O modelo foi aplicado para uma sub-bacia de 6,5 km², com o solo ocupado por matas, pastagem e horticultura. O objetivo dessa aplicação foi, através do melhor entendimento dos processos hidrológicos no riacho Gameleira, avaliar melhor as respostas do rio Tapacurá, de grande importância para a cidade de Recife, quanto ao abastecimento público, controle de inundações e irrigação por pequenos agricultores.

Para essa aplicação, além da elaboração do modelo digital do terreno, foi instalado um sistema de aquisição automática de dados, que armazenou registros de precipitação pluviométrica e vazão a cada minuto ao longo de 32 (trinta e dois meses). Segundo Araújo et al (2005), foi realizada a calibração e validação do TOPSIMPL com alguns eventos chuvosos selecionados e os resultados ajustaram-se bem ao hidrograma medido, quanto à forma da

resposta da bacia a um evento pluviométrico. O horário do pico e a vazão máxima foram obtidos com boa precisão, no entanto para as vazões de base, após a recessão, o ajuste não foi muito bom.

Araújo et al (2005) sugeriram para estudos futuros que, em uma bacia com cobertura vegetal diferenciada, fosse incluída uma distribuição espacial da capacidade de armazenamento da zona radicular em função da cobertura vegetal.

4.3 CÁLCULO DO ÍNDICE TOPOGRÁFICO

4.3.1 Métodos de Cálculo do Índice Topográfico

A descrição da base conceitual do modelo TOPMODEL e também as suas aplicações no Brasil evidenciam a importância do índice topográfico como representante das condições de relevo das bacias hidrográficas modeladas. Segundo Beven et al (1995), o índice topográfico $\ln(a_i/tg\beta_i)$ e o índice solo-topográfico $\ln(a_i/T_0tg\beta_i)$, hipóteses simplificadoras do TOPMODEL, são índices de similaridade hidrológica entre pontos de uma determinada bacia hidrográfica.

Na presente dissertação, a derivação da função de distribuição do índice topográfico na bacia mereceu especial atenção, de modo que são apresentados a seguir alguns métodos usualmente adotados para o cálculo do índice topográfico e sua distribuição na bacia.

Beven & Kirkby (1979; Beven et al 1995) elaboraram inicialmente uma técnica computadorizada para derivar a função de distribuição do índice topográfico baseado na divisão da bacia hidrográfica em unidades de sub-bacia. Cada unidade era, então, discretizada em pequenos elementos de declividade local na bacia em função das linhas de escoamento dominante, inferidas das linhas de maior declividade. O cálculo do $a_i/tg\beta_i$ era realizado para o ponto a jusante de cada elemento. Embora fosse uma aproximação, esse método era justificado pela sua eficiência relativa e porque observações de campo das linhas de escoamento poderiam ser usadas na definição da declividade dos elementos. Em particular, os efeitos de drenagens e estradas no controle efetivo das áreas de contribuição a montante poderiam ser levados em consideração. Tais modificações antrópicas das linhas de escoamento hidrológico naturais não são normalmente incluídas em Modelos Digitais de Terreno (MDT) das áreas de drenagem.

Contudo, dado um MDT, métodos computadorizados mais sofisticados foram sendo disponibilizados. Quinn (1991) desenvolveu um grupo de programas de análise digital de terreno (*Digital Terrain Analysis Fortran Programs - DTA*) baseado em dados de elevação *raster*, com o objetivo de investigar sua utilidade na derivação da informação topográfica requerida pelo TOPMODEL. A aplicação dessas técnicas para estudos de modelagem da bacia foi descrita em Quinn et al (1991) e Quinn & Beven (1993). Nesses artigos, a natureza funcional do índice $a_i/tg\beta_i$ foi discutida em termos da qualidade de representação dos fatores topográficos hidrologicamente significantes, através de métodos de análise digital de terreno.

Outras técnicas também têm sido usadas. A maioria dos MDT *raster* tem sido derivada dos dados de curva de nível digitalizados de mapas existentes. Moore et al (1986; Beven et al, 1995) usava técnicas de análise digital de terreno baseadas nas linhas de fluxo, obtidas diretamente dos dados de curva de nível, para calcular o índice $a_i/tg\beta_i$, uma versão computadorizada do procedimento manual original (e excessivamente exaustivo) de Beven & Kirkby (1979).

Embora essas técnicas ofereçam grande economia de tempo na aplicação do TOPMODEL, facilitando sua utilização, elas também suscitam questões teóricas importantes, das quais duas são provavelmente as mais urgentes. Primeiro, como a área de contribuição a montante deve ser calculada a partir dos dados topográficos e, em segundo, qual escala de resolução deve ser adotada para o MDT da bacia. Os métodos de análise digital de terreno, no contexto do TOPMODEL, podem ter fortes implicações envolvendo os processos hidrológicos inferidos, relacionadas com a topografia, e também nos valores dos parâmetros apropriados.

Segundo Beven et al (1995), o MDT precisa ter uma resolução bastante fina para refletir apropriadamente o efeito da topografia nas linhas de fluxo do escoamento superficial e subsuperficial. Por exemplo, dados de MDT de resolução grosseira erram ao representar algumas feições de declividade convergente, ao passo que uma resolução muito fina pode introduzir perturbações nas direções de escoamento e ângulos de declividade, que não poderiam ser refletidas na superfície da lâmina d'água mais suavizada. A resolução apropriada irá depender da escala das características do relevo, mas 50m ou melhor é normalmente sugerido. A experiência em vários lugares mostra que a escala do MDT usado afeta a distribuição do índice topográfico, induzindo um deslocamento no valor médio do índice topográfico (λ) e nos valores calibrados dos parâmetros. A localização de rios, e sua

influência nas células do MDT que os contém, é também problemática. Existe uma escolha entre permitir que a área a montante continue a acumular ao longo da rede fluvial, ou permitir que o rio aja como um dissipador do escoamento da encosta. O primeiro tende a superestimar, o segundo a subestimar, as áreas de contribuição ripariana se a largura do rio é pequena em comparação com o tamanho da grade do MDT.

Vale a pena notar que a parametrização da distribuição do $\ln(a_i/tg\beta_i)$ pode algumas vezes ser útil. Sivapalan et al (1990) introduziu o uso de uma distribuição gama na versão dele do TOPMODEL. Wendling (1992) também usou uma distribuição gama na função de produção de *runoff* para um modelo de previsão de eventos e Wolock (1993) dá detalhes de uma versão com distribuição gama para simulação contínua (Beven et al, 1995).

Atualmente, em vários países desenvolvidos do mundo, modelos digitais de terreno (MDT) ou modelos digitais de elevação (DEM) estão tornando-se disponíveis em uma resolução bastante fina para representar amplamente a forma da topografia. Os DEM com um tamanho de grade fixo, denominados como *raster data*, e os mapas de curvas de nível digitalizados (DEM's vetoriais) podem estar disponíveis.

Modelos digitais de elevação (DEM's) em grade consistem de uma estrutura de dados em matriz com a elevação topográfica de cada pixel armazenada em um nó da matriz. DEM's de grade são distintos de outras representações de DEM, tais como a TIN (*triangular irregular network*) e as estruturas de armazenamento de dados baseadas em curvas de nível. DEM's em grade são prontamente disponíveis e simples de usar e, por isso, têm tido sua aplicação difundida para análise de problemas hidrológicos (Moore et al., 1991). Contudo, eles sofrem de alguns inconvenientes que surgem da sua natureza gradeada.

De fato, a maioria dos DEM *raster* tem sido criada pela interpolação das curvas de nível digitalizadas e como resultado podem, nesses lugares, estarem sujeitos a erros significativos, particularmente onde na topografia plana existem poucas curvas de nível ou pequenas declividades. A análise de um DEM para derivar as linhas de fluxo de escoamento tem sido um interessante tópico de pesquisa. Os métodos disponíveis dependem se um DEM *raster* ou vetorial está disponível (Beven, 2001).

Tarboton (1997) publicou uma comparação entre métodos para derivar as linhas de fluxo de escoamento a partir de DEM *raster*. Para cada célula da grade, existem oito direções de escoamento possíveis. Podem existir vários elementos da grade no entorno com elevações menores que a célula que está sendo considerada. O problema é como dividir o escoamento potencial entre essas diferentes linhas de fluxo possíveis.

O método inicial e mais simples, para especificar as direções de escoamento, é atribuir o escoamento de cada *pixel* para um de seus vizinhos, adjacente ou diagonalmente, na direção mais íngreme para baixo. Esse método, denominado D8 (8 flow directions), foi desenvolvido por O'Callaghan & Mark (1984; Tarboton, 1997) e tem sido amplamente usado. O D8 apresenta desvantagens resultantes da discretização do escoamento em somente uma das oito direções possíveis separadas por 45° .

No contexto de uma grade, a área A é a área de contribuição para um dado *pixel* e pode ser estimada como o produto do número de *pixels* drenando através desse *pixel* e pela área do *pixel*. A área de contribuição específica a é, então, estimada como A/L , tomando L como a largura do *pixel*.

O método de múltiplas direções de escoamento, desenvolvido por Quinn et al. (1991), tem sido sugerido como uma tentativa para resolver as limitações do D8. Nesse método, o escoamento é dividido de modo fracionário por cada vizinho mais baixo na proporção da declividade daquele vizinho. O método de múltiplas direções de escoamento (*Multiple directions based on Slope – MS*) tem a desvantagem do escoamento de um *pixel* ser dispersado para todos os *pixels* vizinhos com elevação mais baixa. Segundo Tarboton (1997), a dispersão é inerente a qualquer método, incluindo o proposto por ele. Contudo, a dispersão é inconsistente com a definição física da área a montante A e a área de contribuição específica a .

Tarboton (1997) apresentou um novo método para representação das direções de escoamento e cálculo das áreas a montante usando modelos de elevação digital (DEM) de grade retangular. Esse método é denominado D_{∞} (um número infinito de possíveis direções únicas de escoamento). O procedimento é baseado na representação da direção de escoamento como um único ângulo assumido como a declividade para baixo mais íngreme entre as oito faces triangulares centradas em cada ponto da grade. A área a montante é então calculada proporcionando escoamento entre apenas dois *pixels* a jusante, de acordo com a proximidade que essa direção está para o ângulo direto ao *pixel* a jusante. Segundo o autor, esse procedimento oferece melhorias sobre os procedimentos anteriores, que tem restringido o escoamento às oito direções possíveis (introduzindo polarização da grade) ou escoamento proporcionado conforme a declividade (introduzindo dispersão não realista).

Segundo Sorensen et al (2006), a topografia é um controle de primeira ordem na variação espacial das condições hidrológicas. Ela afeta a distribuição espacial da umidade do solo, e freqüentemente, o escoamento subterrâneo segue a topografia da superfície. Por isso, índices topográficos têm sido usados para descrever padrões espaciais de umidade do solo. A

distribuição espacial dos níveis de água subterrânea influencia os processos do solo, que por sua vez irão influenciar as propriedades do solo. Por essas razões, o índice topográfico $\ln(a_i/tg\beta_i)$, também denominado *topographic wetness index* – TWI, tem sido usado para:

- estudar os efeitos da escala espacial nos processos hidrológicos;
- identificar linhas de fluxo hidrológico para modelagem geoquímica (Robson et al, 1992);
- caracterizar processos biológicos, tais como produção da rede primária anual (White & Running, 1994) , padrões de vegetação (Moore et al, 1993; Zinko et al, 2005) e qualidade local da floresta (Holmgren, 1994).

A topografia afeta não somente a umidade do solo, mas também afeta indiretamente o pH do solo. Umidade e pH são variáveis importantes que influenciam a distribuição e riqueza de espécies de plantas vasculares em florestas boreais. Segundo Zinko (2004; Sorensen, 2006), por causa da relação entre topografia e riqueza de espécies de plantas, o TWI tem sido útil para prognosticar a distribuição espacial da riqueza de espécies de plantas vasculares na floresta boreal sueca.

O índice topográfico é usualmente calculado a partir de dados de elevação gradeados e diferentes algoritmos são usados para esses cálculos, sendo que as principais diferenças são: o modo como a área acumulada a montante é encaminhada para jusante; a forma como os *talvegs* são representados; e qual medida de declividade é usada. Güntner et al (2004; Sorensen, 2006) compararam diferentes algoritmos e modificações do TWI com os padrões espaciais das áreas saturadas. Eles concluíram que a habilidade do TWI para prever padrões observados de áreas saturadas era sensível aos algoritmos usados para calcular a área de contribuição a montante e o gradiente de declividade.

Sorensen et al (2006) compararam alguns métodos de cálculo para TWI e também os avaliaram em termos de sua correlação com as seguintes variáveis medidas: riqueza de espécies de plantas vasculares; pH do solo; nível de água subterrânea; umidade do solo; e o grau de umidade. O TWI foi calculado variando seis parâmetros que afetam a distribuição de área acumulada entre as células a jusante e variando o modo de cálculo da declividade. Todas as combinações possíveis desses parâmetros foram calculadas para dois locais de floresta boreal do norte da Suécia. Eles não encontraram um método de cálculo que apresentasse o melhor desempenho para todas as variáveis medidas, mais que isso, os melhores métodos pareceram ser variáveis e específicos do local. Contudo, os autores identificaram algumas características gerais dos melhores métodos para diferentes grupos de variáveis medidas. Os resultados fornecem princípios para escolha do melhor método para estimar riqueza de

espécies, pH do solo, nível da água subterrânea e umidade do solo pelo TWI derivado de modelos digitais de elevação.

Holmgren (1994; Sorensen et al, 2006) ampliou o método de Quinn et al (1991) pela introdução de um componente h que controla a distribuição entre as direções a jusante segundo $tg\beta_i^h / \sum tg\beta_i^h$, onde $0 \leq h \leq \infty$. No estudo de Sorensen et al (2006), a distribuição do escoamento do método de Tarboton teve melhor performance que o método de Quinn, e um valor de h baixo resultou nos melhores resultados.

Entre as experiências brasileiras, Ferreira (2004), no estudo de caso na bacia do ribeirão dos Marins, descreveu detalhadamente o processo desenvolvido para obtenção da função de distribuição do índice topográfico na bacia. A representação do relevo da bacia foi realizada utilizando como base as cartas topográficas planialtimétricas na escala 1:10.000, do Plano Cartográfico do Estado de São Paulo. Dessas cartas foram extraídas as informações relativas à hidrografia e topografia (curvas de nível e pontos culminantes) para montagem dos planos de informação importantes (declividades e índice topográfico). O plano de informação, com as curvas de nível digitalizadas no formato DXF, foi convertido para o formato ASCII utilizando o aplicativo DXFCON (SANTOS, 1998). No programa SURFER (versão 6.01), este arquivo foi importado para executar sua interpolação pelo método da curvatura mínima, obtendo-se o modelo numérico do terreno (MNT). Os arquivos foram exportados para o Sistema de Informação Geográfica – IDRISI for Windows, 46 v.32, compondo o plano de informação de relevo que foi utilizado para caracterização dos dados na escala espacial. Para a elaboração do modelo numérico do terreno (MNT) derivado das cartas topográficas, foram escolhidos quatro tamanhos de células: 30x30m; 50x50m, 70x70m e 100x100m. Foram também levadas em conta, na determinação do tamanho da célula, as limitações impostas pelo TOPMODEL.

A partir do MNT foram determinados outros planos de informação como a carta de declividade dos terrenos. Para obtenção deste plano de informação foi utilizado o programa IDRISI 32. Este plano de informação foi integrado com outros planos para determinação das áreas de acumulação de água.

Para escolha da resolução da escala espacial na simulação do modelo TOMODEL foram levadas em consideração à limitação da estrutura computacional e a qualidade de informação existente na bacia. Assim, a seqüência para escolha da resolução foi a seguinte: 1) determinar o tamanho máximo de malha a ser simulada em função da limitação do modelo; 2) calcular a resolução considerando o tamanho máximo da malha; 3) verificar se a resolução calculada representa as condições das informações existentes e desejáveis para a simulação.

A versão do modelo TOPMODEL utilizada para as simulações das hidrógrafas da bacia foi a TOPWIN (TOPMODEL versão para Windows). Segundo Ferreira (2004), dentre as quatro resoluções espaciais, o tamanho de célula 70m x 70m atendeu as considerações da melhor representação das características da bacia com relação ao processo de simulação do TOPMODEL.

4.3.2 Distribuição do Índice Topográfico na Bacia do Rio Mambucaba

Conforme apresentado anteriormente, na base conceitual do modelo TOPMODEL a topografia do terreno é bastante importante, sendo fornecida ao modelo pela curva de distribuição do índice topográfico na bacia hidrográfica.

Neste trabalho, foram utilizados, para cálculo do índice topográfico, os dados altimétricos da região da bacia hidrográfica do rio Mambucaba, disponíveis em meio digital na escala 1:50.000 e representados por curvas de nível com espaçamento de 20 metros. Esses dados foram importados para um ambiente ArcGIS, *software* para sistemas de informação geográfica desenvolvido pelo Environmental Systems Research Institute - ESRI.

Dentro desse ambiente GIS, foi gerado o modelo digital de terreno da bacia do rio Mambucaba usando interpolação por triangulação (TIN), que representa melhor as características da superfície do terreno. A Figura 4.2 apresenta o modelo digital TIN obtido para a bacia do rio Mambucaba até o posto fluviométrico Fazenda Fortaleza, onde as menores altitudes estão representadas pelo tom mais escuro.

O modelo TIN foi, então, convertido para uma matriz (*raster*) de números que representam a distribuição geográfica das elevações, isto é, para um modelo numérico de terreno MNT. Nessa conversão foram utilizadas quatro dimensões diferentes para o tamanho da célula do MNT: 25m; 50m; 75m; e 100m.

O tamanho da célula é a própria resolução do modelo de terreno, sendo que células de menor tamanho resultam em maior precisão, mas implicam também em uma matriz de tamanho muito maior. Para a bacia do Mambucaba até o posto Fazenda Fortaleza, cuja área de drenagem tem 597 km², as matrizes ficaram com as seguintes dimensões: 1424 colunas x 1691 linhas (célula de 25m); 712 colunas x 846 linhas (50m); 475 colunas x 564 linhas (75m); 356 colunas x 423 linhas (100m).



Figura 4.2: Modelo Digital de Terreno TIN da Bacia do Rio Mambucaba até Faz. Fortaleza

A resolução de 25m é muito próxima do espaçamento de 20m entre curvas de nível presente nos dados básicos de aerofotogrametria disponíveis (escala 1:50.000). Além disso, a bacia do rio Mambucaba até Fazenda Fortaleza tem uma área de drenagem de um tamanho tal que a utilização de um MNT com resolução de 25m exigiria a manipulação de um arquivo *raster* (matriz) com 2.407.984 células. Por outro lado, Beven et al (1994) recomendam que o tamanho da célula do MNT para o cálculo do índice topográfico a ser utilizado no TOPMODEL deve ser igual ou menor a 50m.

Pelas razões expostas, adotou-se o modelo MNT com 50m de resolução para as etapas seguintes de calibração e validação do modelo hidrológico TOPMODEL. No entanto, o efeito da resolução do MNT na curva de distribuição do índice topográfico também foi investigado e seus resultados serão apresentados adiante, ao final deste item. A Figura 4.3 a seguir apresenta uma representação do MNT *raster* obtido para a bacia do rio Mambucaba até o posto fluviométrico Fazenda Fortaleza. Nessa figura, as áreas de menor altitude são as mais escuras.



Figura 4.3: Modelo Numérico de Terreno (*raster*) da Bacia do Mambucaba até Faz. Fortaleza

a) Comparando processos de cálculo do índice topográfico

Conforme apresentado no item anterior, alguma imprecisão nos processos de cálculo do índice topográfico é claramente inevitável, mas os métodos que dão os melhores resultados parecem ser o algoritmo de direção múltipla de escoamento de Quinn et al (1995) e o algoritmo do vetor resultante de Tarboton (1997).

Para avaliar essa questão no caso da bacia do rio Mambucaba, a distribuição do índice topográfico foi calculada por três processos diferentes. O primeiro processo consiste na execução do programa computacional GRIDATB, baseado no algoritmo de direção múltipla e desenvolvido na Lancaster University (UK) especificamente para esse fim. No segundo processo, foram utilizados o algoritmo D8 e a extensão Arc Hydro Tools do software ArcGIS. Finalmente, no terceiro processo, empregou-se o programa TauDEM, que utiliza o algoritmo D_{∞} e foi desenvolvido por David Tarboton na Utah State University (USA).

O programa computacional GRIDATB, versão 95.01, foi escrito originalmente em 1983 e revisado em 1995, utilizando a linguagem FORTRAN. Ele é um dos programas que compõem um grupo maior de programas de análise digital de terreno denominado DTA, desenvolvido para ser utilizado na derivação da informação topográfica requerida pelo TOPMODEL. GRIDATB é um programa de uso livre desenvolvido na Lancaster University.

Esse programa calcula os valores do índice topográfico a partir dos dados de elevação do terreno fornecidos em uma matriz, tendo como resultado a curva de distribuição dos valores obtidos para a bacia em estudo. GRIDATB pode ser considerado como uma forma clássica de obtenção do índice topográfico para ser utilizado no modelo TOPMODEL.

Em sua aplicação na bacia do Mambucaba, a matriz de entrada do programa GRIDATB foi obtida do MNT gerado com células de 50m, dentro do ambiente ArcGIS. O mapa *raster* foi exportado para um arquivo ASCII, posteriormente formatado de acordo com a entrada de dados do programa.

O programa Fortran sofreu uma pequena adaptação para ser utilizado no presente trabalho, tendo em vista que o tamanho da matriz (*raster*) da bacia do Mambucaba, resolução 50m, tem uma dimensão muito superior ao limite do programa original.

No segundo processo de cálculo da distribuição do índice topográfico, a partir do MNT com 50m de resolução, foi utilizada a extensão Arc Hydro Tools do ArcGis, que tem várias ferramentas desenvolvidas especificamente para estudos hidrológicos. Ao mapa *raster*, foi aplicada a ferramenta *Fill Sinks*, que preenche eventuais depressões localizadas do MNT, evitando dispersão nos passos seguintes. A seguir, foi utilizada a ferramenta *Flow Direction*, que utiliza o algoritmo *D8* (oito direções de escoamento), descrito no item anterior, para determinar a direção de escoamento em cada célula da bacia. A última ferramenta Arc Hydro utilizada foi a *Flow Accumulation*, que a partir do mapa resultante do *D8* calcula qual o número total de células que contribui para cada *pixel*.

Em paralelo, ao MNT foi aplicada também a ferramenta *Slope*, que determina a declividade do terreno em cada célula. A Figura 4.4 a seguir apresenta o mapa de área acumulada da bacia do rio Mambucaba obtida até o posto fluviométrico Fazenda Fortaleza. As áreas vermelhas são as de maior concentração de área contribuinte.

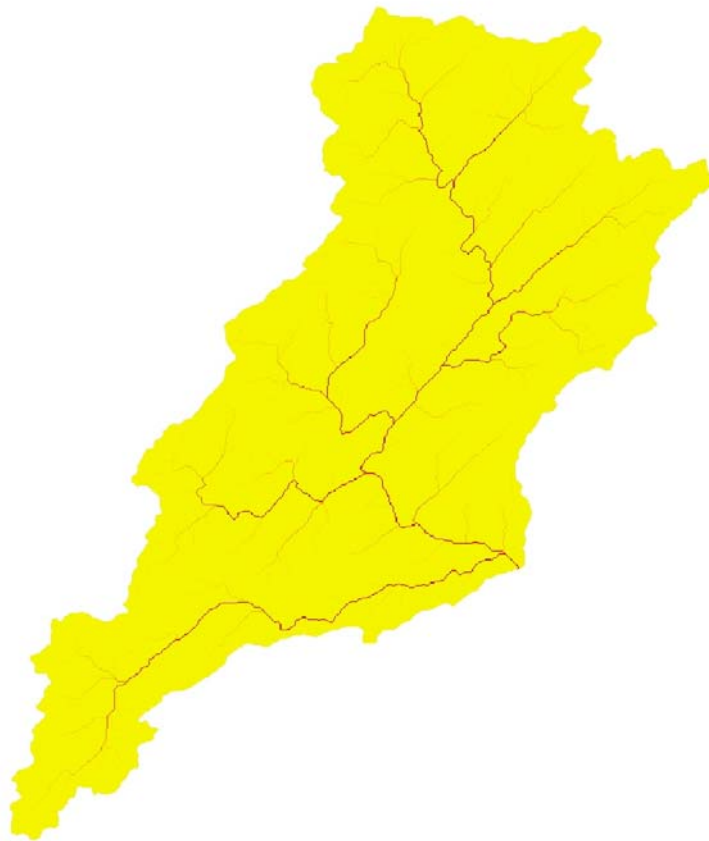


Figura 4.4: Área Contribuição Acumulada da Bacia do Mambucaba até Faz. Fortaleza

Depois dessas etapas de processamento dos dados, para o cálculo do índice topográfico propriamente dito, foi utilizada outra extensão do ArcGIS, a *Spacial Analyst*. A ferramenta *Raster Calculator* dessa extensão permite a realização de operações matemáticas com os arquivos *raster*, que são realizadas célula a célula. A equação utilizada foi

$$Topindex = Ln\left(\frac{((Fac + 1) \times A_{célula} / L_{célula})}{Slope}\right)$$

onde

Topindex = mapa *raster* com valores de índice topográfico

Fac = mapa *raster* resultante da ferramenta *Flow Accumulation*

A_{célula} = área de uma célula

L_{célula} = comprimento do lado de uma célula

Slope = mapa *raster* resultante da ferramenta *Slope*.

Então, o mapa *raster Topindex* foi exportado para um arquivo ASCII, cujos valores definiram a curva de distribuição do índice topográfico utilizada no modelo TOPMODEL.

O terceiro processo aplicado neste trabalho baseia-se no algoritmo D_{∞} , elaborado por Tarboton em 1997. Posteriormente, um conjunto de ferramentas para análise de terreno usando modelos digitais de elevação, denominado TauDEM (*Terrain Analysis Using Digital Elevation Model*), foi desenvolvido por Tarboton (2005) e montado como uma extensão para os softwares ArcGIS (8.x e 9.x) e MapWindow. TauDEM é um programa de uso livre desenvolvido na Utah State University.

Entre as diversas ferramentas do TauDEM, existem três muito úteis para o cálculo do índice topográfico. A primeira é a *Dinf Flow Directions*, que a partir do mapa *raster* de elevações gera um mapa de direções de escoamento empregando o algoritmo D_{∞} . A segunda é a *Dinf Contributing Area*, que calcula a área de contribuição a cada célula utilizando o mesmo algoritmo. E, por último, a ferramenta *Slope/Area (Wetness Index Inverse)* que, a partir dos mapas *raster* anteriores, calcula o fator da declividade pela área específica de contribuição em cada célula.

Depois de utilizar essas ferramentas do TauDEM, com o auxílio do *Raster Calculator* do ArcGIS, foi obtido o mapa do índice topográfico calculando o \ln do inverso do mapa *raster* resultante da ferramenta *Wetness Index Inverse*. A Figura 4.5 apresenta um mapa de representação do índice topográfico da bacia do rio Mambucaba obtida até o posto fluviométrico Fazenda Fortaleza, calculado pelo algoritmo D_{∞} .

As áreas mais escuras do mapa são as de menor índice topográfico seguindo numa gradação até as áreas mais claras, que são as de maior índice topográfico. Portanto, as áreas mais claras do mapa são as de maior tendência de saturação na bacia do rio Mambucaba. À semelhança do processo anterior, o mapa *raster* final foi exportado para um arquivo ASCII, cujos valores definiram a terceira curva de distribuição do índice topográfico utilizada no modelo TOPMODEL.



Figura 4.5. Mapa de Índice Topográfico da Bacia do Rio Mambucaba até Fazenda Fortaleza

Posteriormente, as curvas de distribuição obtidas nos três processos foram comparadas, conforme apresentado nas Figuras 4.6 e 4.7 e no Quadro 4.1 a seguir.

Pode-se observar que as curvas de distribuição do índice topográfico, calculadas pelos três processos, não se diferenciam muito. Os valores médios do índice topográfico (λ) resultantes dos processos 1 e 3 ficaram muito próximos, assim como os valores máximos obtidos. Nos valores mínimos, os processos 2 e 3 se aproximaram.

A curva de distribuição acumulada obtida com o processo 2 apresenta valores maiores de índice topográfico. Como esse índice representa a tendência de um determinado ponto da bacia em desenvolver condições saturadas, e a bacia é considerada como composta por sub-bacias homogêneas, que correspondem às classes de índice topográfico, a bacia tenderia a saturar mais rápido durante as simulações, caso essa curva de distribuição fosse adotada, em detrimento das outras duas curvas.

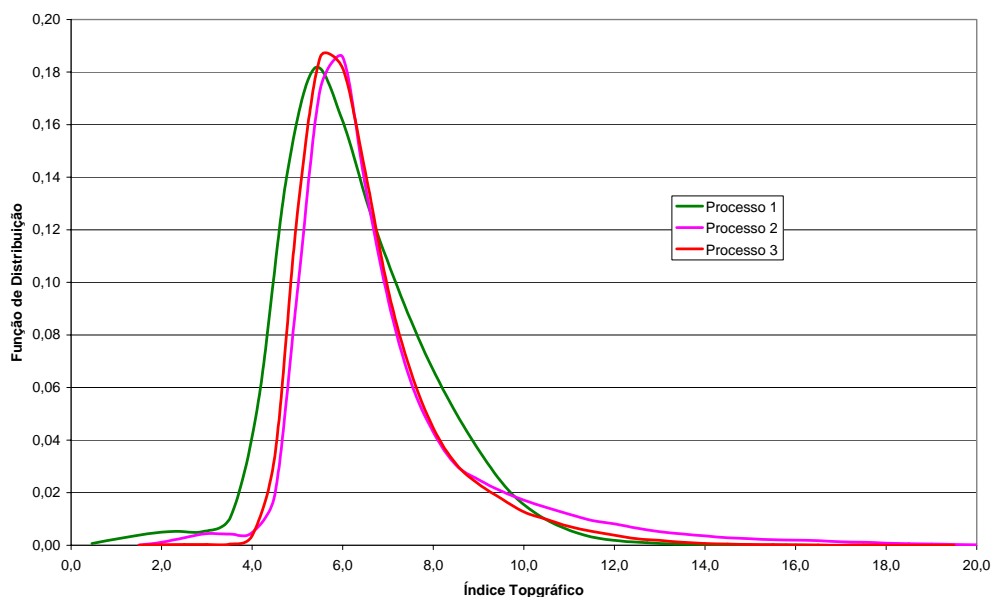


Figura 4.6: Curvas de Distribuição dos Valores de Índice Topográfico da Bacia do Mambucaba até Fazenda Fortaleza para Diferentes Processos

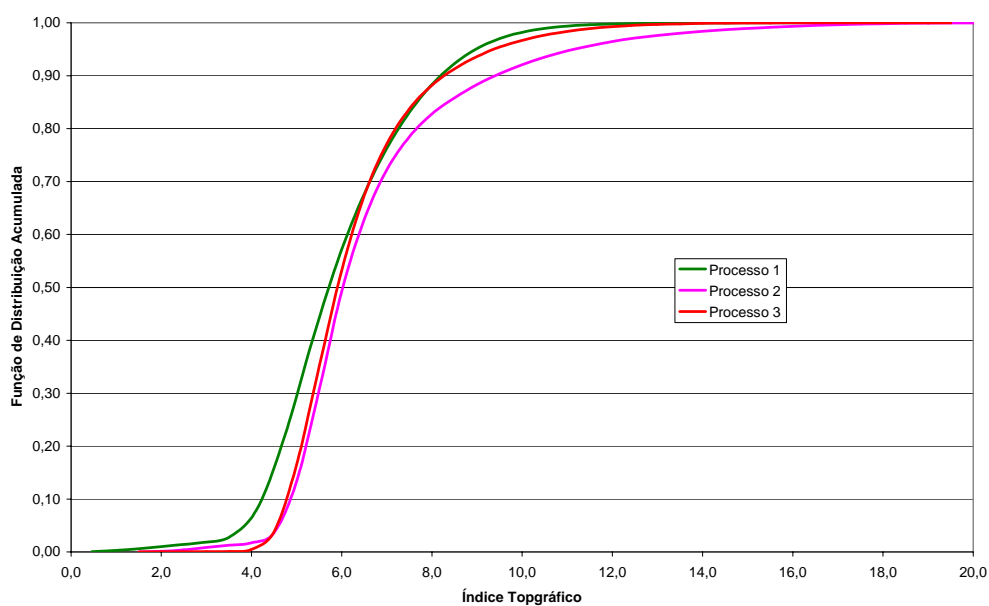


Figura 4.7: Curvas de Distribuição Acumulada dos Valores de Índice Topográfico da Bacia do Mambucaba até Fazenda Fortaleza para Diferentes Processos

Quadro 4.1: Resultados dos Diferentes Processos de Cálculo do Índice Topográfico

Processo	Algoritmo	λ	TI máx	TI min
1	MS	6,58	18,24	0,46
2	D8	7,04	24,74	1,33
3	$D\infty$	6,77	18,77	1,23

Como resultado desse esforço de cálculo por três processos diferentes, foi possível também fazer uma importante verificação da metodologia de determinação da curva de distribuição do índice topográfico, que será posteriormente utilizada na modelagem hidrológica. Vale lembrar que no TOPMODEL a topografia é considerada como participante do processo de formação do escoamento superficial, e é representada no modelo através dessa curva de distribuição do índice topográfico. A bacia estará melhor representada no modelo quanto mais próxima da realidade e precisa for a curva de distribuição fornecida ao modelo.

Conforme apresentado no item anterior, estudos recentes têm recomendado o método D_{∞} como mais preciso para cálculo do índice topográfico, de modo que a curva de distribuição do índice topográfico obtida pelo Processo 3 foi adotada como a mais representativa da bacia do rio Mambucaba até Fazenda Fortaleza, tendo sido utilizada na calibração do modelo.

b) Comparando a distribuição do índice topográfico nas sub-bacias

Na conceituação do modelo TOPMODEL, todos os pontos da bacia com o mesmo valor de índice topográfico apresentam o mesmo comportamento hidrológico: é a idéia de similaridade hidrológica. Pensando nesta questão, uma análise realizada neste trabalho foi a comparação das curvas de distribuição obtidas para diversas sub-bacias da própria bacia do rio Mambucaba.

Para isso, foi aplicado o Processo 3 (programa TauDEM) em cinco áreas de contribuição. A primeira sub-bacia é a do posto fluviométrico Fazenda das Garrafas, com 22,4 km² de área de drenagem, localizada no extremo norte da bacia. A segunda é a área de contribuição do rio Mambucaba até uma seção um pouco a montante de sua confluência com o córrego da Memória, afluente da margem esquerda, denominada neste trabalho como Área Norte, com 328 km². Essa área abrange a sub-bacia de Fazenda das Garrafas.

A terceira é uma parcela da sub-bacia do rio Funil, afluente da margem direita do Mambucaba, denominada Área Sul, com apenas 50,8 km². A quarta é a do posto fluviométrico Fazenda Fortaleza, com 597 km², para a qual foi posteriormente calibrado o modelo TOPMODEL, e que inclui as três primeiras áreas. E, finalmente, a quinta área abrange toda a bacia do rio Mambucaba até a Vila Mambucaba, com 736 km². A Figura 4.8 ilustra as áreas de contribuição estudadas, .



Figura 4.8: Áreas de Contribuição das Sub-bacias do Rio Mambucaba Estudadas

Para cada uma dessas áreas de contribuição, foi gerado um MNT, calculado o índice topográfico, pelo mesmo processo 3, e determinada a curva de sua distribuição na bacia. As Figuras 4.9 e 4.10 e o Quadro 4.2 a seguir mostram os resultados obtidos.

Quadro 4.2: Resultados da Distribuição do Índice Topográfico nas Diferentes Áreas de Contribuição

Sub-bacia	Área (km ²)	λ	TI máx	TI min
Faz. das Garrafas	22,4	6,58	15,38	1,17
Área Sul	50,8	6,73	16,77	1,60
Área Norte	328	6,69	18,99	1,23
Faz. Fortaleza	597	6,77	18,77	1,23
Vila Mambucaba	736	6,77	18,89	1,35

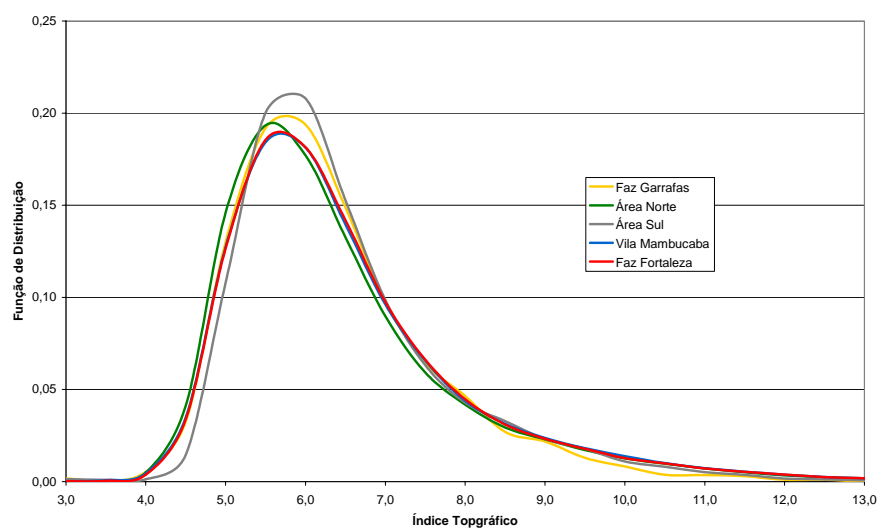


Figura 4.9: Distribuição dos Valores de Índice Topográfico para Diversas Áreas de Contribuição da Bacia do Rio Mambucaba

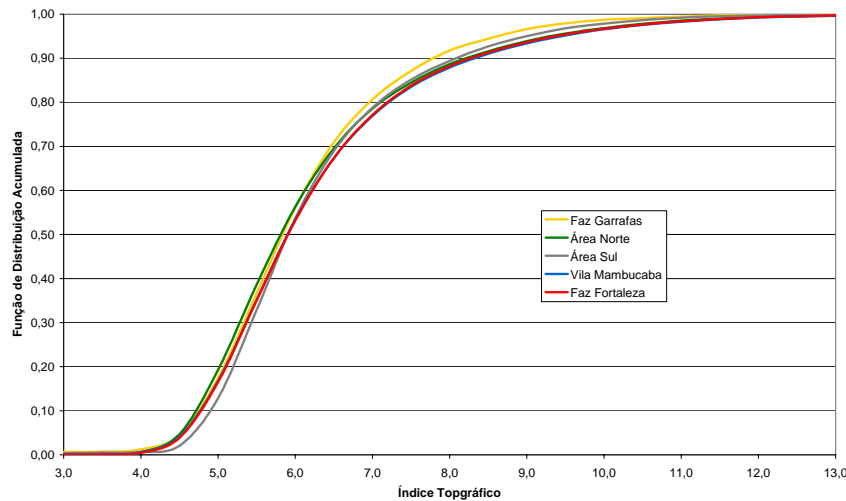


Figura 4.10: Distribuição Acumulada dos Valores de Índice Topográfico para Diversas Áreas de Contribuição da Bacia do Rio Mambucaba

Esse resultado evidencia uma grande homogeneidade da bacia em termos de distribuição do índice topográfico. Com áreas variando de 22,4 km² a 736 km², as curvas de distribuição são muito próximas, quase coincidentes.

Os valores médios de índice topográfico λ variaram de 6,58 a 6,77, resultando numa diferença inferior a 3 % entre as áreas. Considerando ainda que a maior área é 32 vezes maior que a menor área estudada, esse resultado é ainda mais interessante.

Na bacia do Mambucaba, para as áreas maiores, além das médias, os valores máximos e mínimos do índice topográfico também ficaram muito próximos.

c) Comparando curvas de distribuição do índice topográfico obtidas de MNTs com diferentes resoluções

Conforme citado anteriormente, o modelo digital de terreno TIN da bacia do rio Mambucaba até Fazenda Fortaleza foi convertido para uma matriz (*raster*) utilizando quatro diferentes tamanhos de célula: 25m; 50m; 75m; e 100m.

Em cada mapa *raster* foi aplicado o processo 3, isto é, aquele que utiliza o programa TauDEM e calcula a distribuição do índice topográfico na bacia com o auxílio da ferramenta *Raster Calculator* do ArcGIS. As Figuras 4.11 e 4.12 e o Quadro 4.3 mostram os resultados obtidos.

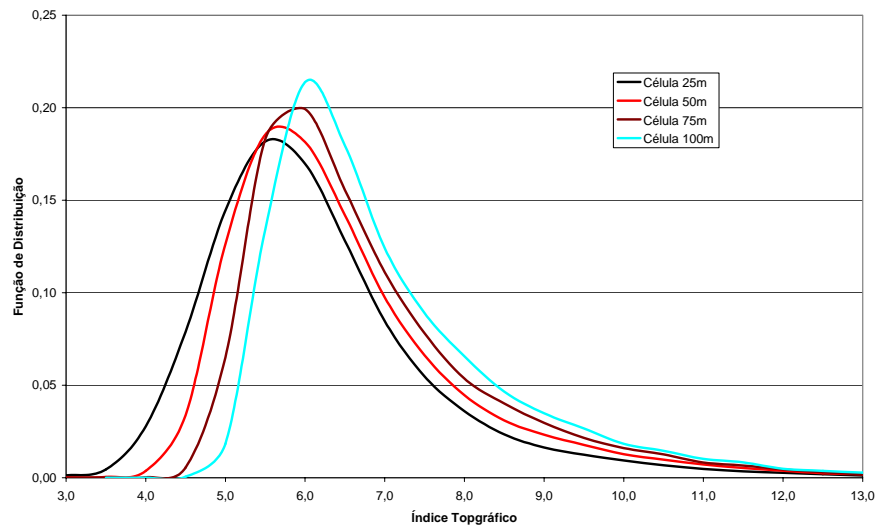


Figura 4.11: Distribuição dos Valores de Índice Topográfico da Bacia do Mambucaba até Fazenda Fortaleza para Diferentes Resoluções do MNT

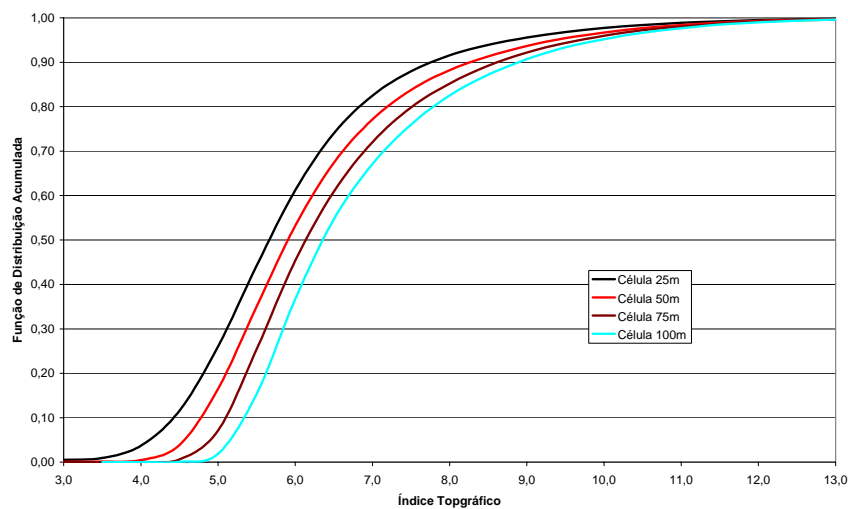


Figura 4.12: Distribuição Acumulada dos Valores de Índice Topográfico da Bacia do Mambucaba até Fazenda Fortaleza para Diferentes Resoluções do MNT

Quadro 4.3: Resultados da Distribuição do Índice Topográfico para Diferentes Resoluções do MNT

Resolução do MNT	λ	<i>TI máx</i>	<i>TI mín</i>
25m	6,42	20,15	-0,33
50m	6,77	18,77	1,23
75m	7,05	18,70	2,20
100m	7,30	19,10	3,47

Pode-se observar que a resolução do MNT acarreta uma sensível alteração na distribuição do índice topográfico na bacia do rio Mambucaba, de modo que é uma questão importante na aplicação do modelo, conforme já havia sido constatado em estudos anteriores.

Os valores médios do índice topográfico λ aumentam com a dimensão da célula usada para geração MNT, de modo que o MNT com melhor resolução (25m) tem λ menor, igual a 6,42, e o de pior resolução (100m) tem λ maior, igual a 7,30m .

Um resultado curioso é a ocorrência de valor mínimo inferior a zero quando a resolução do MNT foi 25m, o que exige pesquisa sobre o seu significado.

Esse resultado mostra que a resolução adotada na geração do MNT, na bacia do rio Mambucaba, deverá interferir bastante na representação, dentro do modelo TOPMODEL, da tendência de um determinado ponto da bacia desenvolver condições saturadas.

4.4 SIMULAÇÃO DE VAZÕES NO RIO MAMBUCABA

4.4.1 Calibração do Modelo

O modelo hidrológico TOPMODEL foi calibrado para a bacia do rio Mambucaba utilizando os dados disponíveis da estação fluviométrica Fazenda Fortaleza (código 59370000), localizada no município de Angra dos Reis. A entidade responsável por essa estação é a ANA, sendo sua operação realizada pela CPRM. A estação Fazenda Fortaleza, que controla uma área de drenagem de 597 km². foi instalada em 1935 e continua em operação.

A bacia hidrográfica do rio Mambucaba até Fazenda Fortaleza tem uma altitude média de 1250 m, ficando a altitude máxima em torno de 2080m. A estação fluviométrica está localizada a uma altitude de 130 m.

A outra estação fluviométrica ainda em operação na bacia do rio Mambucaba é Fazenda das Garrafas, que controla uma área de drenagem de apenas 22 km², certamente com respostas hidrológicas muito rápidas durante os eventos chuvosos. Como os dados fluviométricos disponíveis nessa estação são valores médios diários, descartou-se a possibilidade de utilizá-la na calibração do modelo, devido à inexistência de hidrogramas que pudessem representar a variação das vazões do rio Mambucaba nessa seção.

Para representação da chuva no modelo, foram utilizados os dados das estações pluviométricas de Fazenda das Garrafas e Vila Perequê, localizadas na bacia do rio Mambucaba.

Foram analisados os hidrogramas de chuva e vazão dos postos selecionados, principalmente no período mais recente, posterior a 1995. Depois de descartados os períodos com falhas, mesmo aquelas com apenas um dia sem observação, foi selecionado o período de 12/01/00 a 05/02/00 (25 dias) para calibração do modelo TOPMODEL.

Para obtenção da chuva média diária na bacia, foram atribuídos pesos aos postos Fazenda das Garrafas e Vila Perequê, definidos após análise conjunta dos pluviogramas e também do fluviograma de Fazenda Fortaleza. Os pesos adotados foram 0,3 para Fazenda Garrafas e 0,7 para Vila Perequê.

Com relação à evapotranspiração potencial, não havia dados climatológicos disponíveis na bacia do Mambucaba, de modo que foram utilizados os dados da estação de monitoramento da Eletronuclear localizada na Usina Nuclear em Angra dos Reis. Para os períodos selecionados para calibração e validação do modelo, foram disponibilizados registros horários de temperatura e ventos. A partir desses dados, foi calculada a evapotranspiração potencial diária para a estação climatológica de Angra no período 01/09/98 a 31/08/00, pelo método de Penman (Villa Nova & Reichardt, 1989; Maidment, 1992).

Embora não disponha de calibração automática, a versão do TOPMODEL adotada nessa dissertação é a do Programa TMOD9502, do Institute of Environmental and Biological Sciences da Lancaster University, UK. Essa versão foi elaborada por Keith Beven em 1985 e revisada em 1995. O programa escrito em Fortran sofreu uma pequena adaptação para ser utilizado no presente trabalho, limitado à entrada de dados e saída dos resultados, de modo a facilitar a calibração do modelo.

Os dados de entrada para o modelo são os seguintes:

- a distribuição do índice topográfico na bacia, obtido a partir do MNT;
- a curva área-distância;
- as séries diárias observadas de precipitação, evapotranspiração potencial e vazão observada.

Esse programa permite cálculos para uma ou mais sub-bacias, porém, os dados de entrada de chuva e evapotranspiração potencial médios devem ser válidos para a bacia com um todo.

O programa permite intervalos horários de tempo para a simulação, mas como a disponibilidade de dados fluviométricos na bacia do rio Mambucaba é de séries de vazões médias diárias, o intervalo de tempo para simulação foi definido como 24 horas.

Além das séries de chuva e evapotranspiração potencial, foram também fornecidas ao modelo as seguintes condições iniciais da bacia: a vazão inicial do escoamento (Q_0), admitida normalmente como igual ao primeiro valor da série observada, e o valor inicial do déficit na zona de raízes (SR_0).

A versão utilizada do TOPMODEL apresenta cinco parâmetros a serem calibrados:

- m , parâmetro exponencial que representa a altura efetiva do perfil do solo, em (m);
- T_0 , valor médio do $\ln T_0$ na bacia, em $\ln(\text{m}^2/\text{h})$, sendo que T_0 representa a transmissividade do solo saturado;
- T_d , tempo de resposta na zona não saturada do solo por unidade do déficit de armazenamento, em (h/m);
- CHV , velocidade de propagação no canal principal, em (m/h);
- RV , velocidade de propagação das sub-bacias internas, em (m/h);
- SR_{max} , capacidade máxima de água disponível na zona das raízes, em (m).

A versão utilizada TMOD9502 realiza o cálculo de três funções objetivo diferentes. A primeira função é a soma dos erros quadráticos $F1$. A segunda é a soma dos erros absolutos $F2$. A terceira é dada pelo coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe E , equação (27) apresentada anteriormente.

Segundo Mine & Clarke (1996), o parâmetro m pode ser estimado inicialmente pela análise de alguns períodos de recessão do fluviograma da bacia, através de gráficos de $1/Q$ em relação ao tempo. Nesses gráficos, cada recessão deve resultar numa linha reta. Esse procedimento foi realizado para a bacia do Mambucaba e os resultados obtidos estão apresentados na Figura 4.13 e no Quadro 4.4, a seguir.

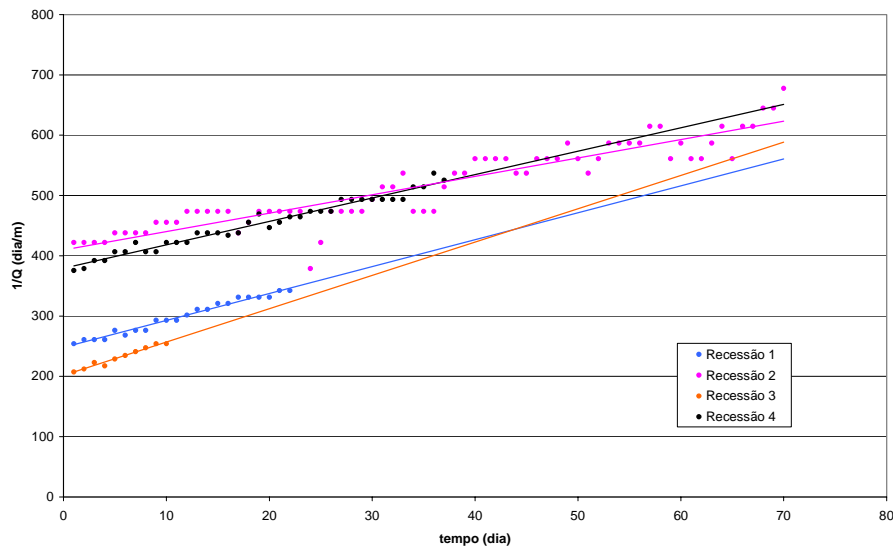


Figura 4.13: Curvas de Recessão para Estimativa Inicial do Parâmetro m

Quadro 4.4: Resultados da Estimativa do Parâmetro m na Bacia do Mambucaba

Recessão	Período	Valor de m
1	11/05/91 a 01/06/91	0,224
2	22/06/93 a 30/08/93	0,328
3	12/04/99 a 21/04/99	0,181
4	13/05/00 a 18/06/00	0,257

Segundo Schuler et al (2000), a interpretação física do parâmetro m é que ele atua como controlador da profundidade efetiva do solo e, junto com a transmissividade saturada (T_0), determina a zona ativa do solo onde ocorre o escoamento subsuperficial. Quanto maior o valor de m , maior a espessura da camada do solo considerada como condutora para o regime subsuperficial e, quanto mais profundo for o solo, mais lentos tornam-se os processos de geração de vazão.

No trabalho de análise de sensibilidade dos parâmetros do TOPMODEL desenvolvido por Schuler et al (2000) nas cabeceiras do rio Corumbataí, nos períodos em que o parâmetro mostrou sensibilidade, normalmente a grandeza dos valores aceitáveis para simular a vazão se aproximou da estimativa dos levantamentos pontuais de campo, não tendo relação com os valores obtidos pelo método da recessão. Além disso, o modelo mostrou sensibilidade a este parâmetro nas simulações dos períodos quinzenais, mas não nos eventos.

No presente trabalho, buscou-se manter o parâmetro m dentro dos limites dos valores obtidos no método da recessão, sugerido por Mine & Clarke (1996).

No início da fase de calibração, buscou-se, com base na bibliografia disponível, avaliar limites aceitáveis para todos os parâmetros do modelo. No entanto, uma grande singularidade do presente trabalho é a aplicação do TOPMODEL a uma bacia hidrográfica relativamente grande, com área de drenagem de 597 km², se comparado às aplicações usuais.

Ranzini et al (2004), no seu trabalho em uma microbacia florestada da Serra do Mar, propuseram limites para os parâmetros do modelo. Esses limites foram comparados com os valores apresentados em outros trabalhos publicados sobre experiências brasileiras com o TOPMODEL, de modo que foram adotados na calibração do Mambucaba, com exceção do $\ln T_o$. Mine & Clarke encontraram valores superiores a 1 para esse parâmetro, de modo que seu limite superior foi ampliado para 5. O Quadro 4.5 apresenta a faixa de valores considerada.

Quadro 4.5: Faixa de valores dos parâmetros do TOPMODEL utilizada na calibração

Parâmetro	Valor Mínimo	Valor Máximo
m	0,050 m	0,500 m
$\ln T_o$	-3 ln (m ² /h)	5 ln (m ² /h)
Td	0,1 h/m	50 h/m
SR_{max}	0,030 m	0,100 m
SR_o	0,010 m	0,100 m

O valor inicial do déficit de armazenamento na zona de raízes (SR_o) foi incluído aqui como um parâmetro a ser calibrado, com base nos resultados do trabalho de Schuler et al (2000). O parâmetro SR_o mostrou maior efetividade na simulação de eventos do que em períodos, porque em períodos maiores de tempo, o efeito do déficit inicial é compensado ao longo da simulação. Contudo, os resultados mostraram que, para eventos, a sensibilidade ao déficit inicial é, inclusive, maior que a sensibilidade ao SR_{max} .

Ainda no trabalho de Schuler et al (2000), a sensibilidade ao parâmetro SR_{max} , definido como déficit máximo da zona radicular, foi presente tanto nos períodos quanto nos eventos, com valores médios bem próximos ao estimado pelo estudo de campo, o que indica a possibilidade de se fixar este parâmetro quando existem dados de porosidade do local.. Este parâmetro tem relação direta com a determinação da evapotranspiração real, que depleciona o armazenamento na zona das raízes quando a zona drenada por gravidade é exaurida. No estudo de Moraes et al (2003), a capacidade máxima de armazenamento (SR_{max}) estimada em campo apresentou valores da mesma ordem de grandeza dos obtidos através de calibração. Infelizmente, não estavam disponíveis valores sobre a porosidade dos solos da bacia do rio

Mambucaba, de modo que não foi possível utilizar esse recurso como facilitador da calibração.

O modelo foi calibrado apenas para um período de 25 dias de duração. A Figura 4.14 a seguir apresenta o hidrograma obtido na simulação com modelo calibrado e o hidrograma observado no período de 25 dias, de 12/01/2000 a 05/02/2000. O conjunto final dos parâmetros obtidos para o modelo calibrado está apresentado no Quadro 4.6.

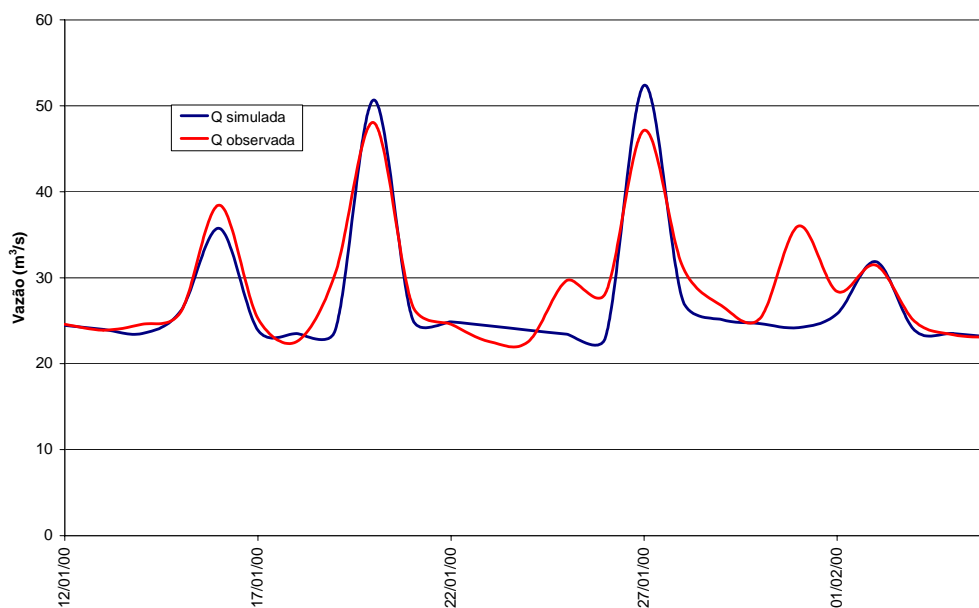


Figura 4.14: Vazões do Rio Mambucaba em Faz. Fortaleza – Calibração do modelo TOPMODEL

Quadro 4.6: Parâmetros do TOPMODEL Calibrado para a Bacia do Mambucaba

Parâmetro	Valor da Calibração
m	0,181 m
$\ln T_0$	-0,75 ln (m ² /h)
Td	0,10 h/m
CHV	3600 m/h
RV	3600 m/h
SR_{max}	0,050 m

Na simulação do modelo calibrado, a soma dos erros quadráticos $F1$, que representa a qualidade de ajuste do modelo principalmente quanto aos picos do hidrograma, resultou em 0,0000071. A soma dos erros absolutos $F2$, que é mais representativa da qualidade de ajuste

do modelo quanto aos valores médios, resultou em 0,0089, que corresponde a cerca de 8,5% da soma das vazões observadas.

O coeficiente de eficiência do modelo E , de Nash e Sutcliffe, foi calculado como 0,72 na simulação do modelo calibrado. Quanto mais próximo o coeficiente estiver de 1, maior é a eficiência do modelo na previsão das vazões. Iorgulescu et al (1994) consideram que coeficientes de eficiência superiores a 0,7 são indicativos de alta eficiência do modelo.

Uma grande particularidade do presente trabalho foi ter sido aplicado o TOPMODEL a uma bacia relativamente grande, sem a divisão em sub-bacias menores, com área de drenagem muito maior às aplicações anteriores realizadas em bacias brasileiras.

4.4.2 Validação do Modelo

Para verificação da validade do modelo hidrológico TOPMODEL calibrado para a bacia do rio Mambucaba, foi selecionado apenas um período: de 01 de setembro de 1999 a 26 de novembro de 1999, totalizando 87 dias. A escolha de um período maior para validação, utilizando os mesmos parâmetros da calibração de 25 dias, teve como objetivo verificar o comportamento do modelo em períodos contínuos durante várias recessões.

Da mesma forma que para calibração, foram utilizados os seguintes dados disponíveis para o período de validação:

- precipitação diária das estações Vila Perequê (peso 0,7) e Fazenda das Garrafas (peso 0,3);
- evapotranspiração potencial diária calculada pelo método de Penman para a estação climatológica da Eletronuclear na Usina de Angra, transferida para a bacia do rio Mambucaba através de um fator de correção;
- vazões médias diárias observadas na estação Fazenda Fortaleza.

Para o período de 87 dias, a soma dos erros quadráticos $F1$ resultou em 0,000063 e a soma dos erros absolutos $F2$ ficou em 0,044. O coeficiente de eficiência do modelo E , de Nash e Sutcliffe, foi calculado como 0,54. Apesar do coeficiente de eficiência não ter alcançado 0,7, o modelo representou corretamente os picos do hidrograma, como pode ser visto na Figura 4.15 a seguir. A soma dos erros absolutos ($F2$) corresponde a 19% da soma das vazões observadas, resultado que pode ser considerado bom para um período de validação.

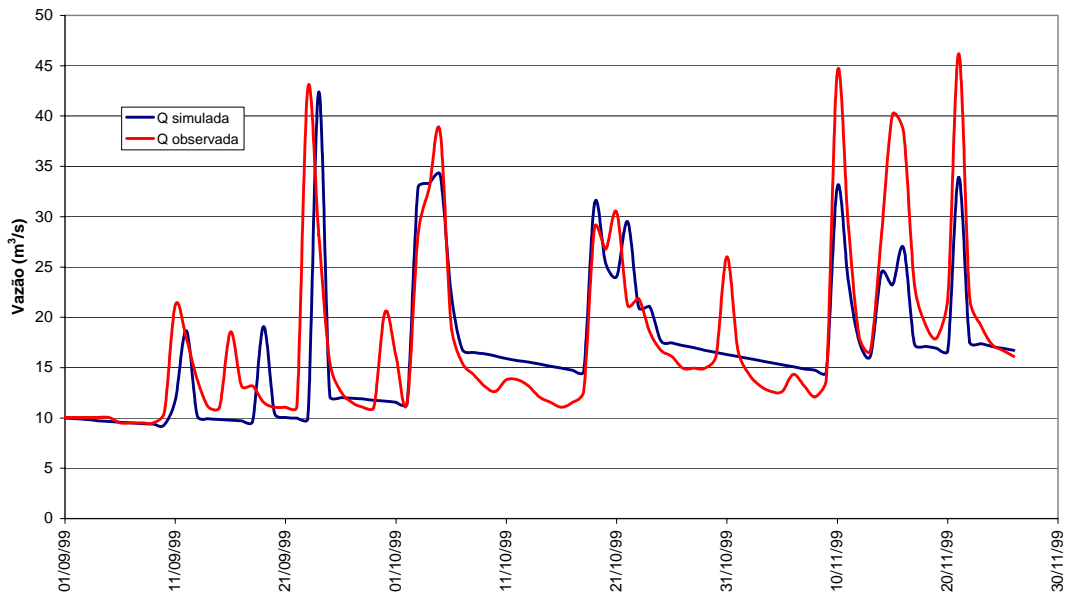


Figura 4.15: Vazões do Rio Mambucaba em Fazenda Fortaleza - Validação do Modelo TOPMODEL

Pode-se observar que o modelo não conseguiu representar de modo adequado a forma do hidrograma na recessão. Deve-se enfatizar, entretanto, que em diversas datas, a falta de representatividade da chuva (apenas 2 postos disponíveis) foi responsável pelos erros na modelagem. Esse resultado é semelhante ao obtido por Araújo et al (2005), na modelagem hidrológica da bacia do rio Riacho Gameleira, em Pernambuco, trabalho no qual foi utilizado o TOPSIMPL, uma versão simplificada do modelo TOPMODEL

Com base nesses resultados o modelo calibrado foi considerado satisfatório para a bacia do rio Mambucaba até Fazenda Fortaleza, ainda que pudesse ser melhorado, através da calibração de outros períodos e da ampliação da faixa dos valores dos parâmetros.

4.4.3 Influência da Distribuição do Índice Topográfico na Simulação das Vazões

Uma análise realizada no presente trabalho foi a da influência da distribuição do índice topográfico na bacia para simulação das vazões do rio Mambucaba, utilizando o modelo TOPMODEL já calibrado.

Anteriormente, no item 4.2.2, foram apresentados e comparados os resultados obtidos para a curva de distribuição do índice topográfico segundo três aspectos: o processo de cálculo do índice topográfico; as diferentes áreas de contribuição (sub-bacias) da própria

bacia do rio Mambucaba; e a resolução adotada para obtenção do modelo numérico de terreno.

Como uma forma de aprofundamento do trabalho, esses aspectos foram analisados também do ponto de vista de sua influência na simulação de vazões pelo modelo, conforme apresentado a seguir.

O primeiro aspecto analisado foi o processo adotado para cálculo do índice topográfico e sua distribuição na bacia. Para isso, foram comparados os resultados obtidos, para a bacia do rio Mambucaba até Fazenda Fortaleza, segundo três processos diferentes: o algoritmo das direções múltiplas de escoamento (processo 1); o algoritmo *D8* (processo 2); e o algoritmo *D ∞* (processo 3). Os três processos foram realizados a partir do mesmo modelo numérico de terreno, gerado com a resolução de 50m.

Conforme apresentado no item 4.3.1, o modelo TOPMODEL foi calibrado com a curva de distribuição do índice topográfico obtida no Processo 3. Posteriormente, cada uma das outras duas curvas foi introduzida no modelo calibrado, em substituição a essa curva, e foram simuladas as vazões do rio Mambucaba em Fazenda Fortaleza. Com isso, pretendeu-se avaliar a variação do hidrograma em função das diferenças, ainda que pequenas, encontradas nas curvas de distribuição do índice topográfico obtidas por diferentes processos. A Figura 4.16 e o Quadro 4.7 a seguir apresentam os resultados obtidos.

Quadro 4.7: Resultados da Simulação com Curvas de Distribuição Obtidas de Diferentes Processos

Processo	λ	<i>Q med</i> (m/h)	<i>Q max</i> (m/h)	<i>Q min</i> (m/h)	<i>E</i>	<i>F1</i>	<i>F2</i>
1	6,58	0,0041	0,0083	0,0033	0,61	0,0000099	9,9%
2	7,04	0,0039	0,0086	0,0030	0,38	0,0000159	13,6%
3	6,77	0,0039	0,0076	0,0034	0,72	0,0000071	8,5%
Observado	-	0,0042	0,0071	0,0033	-	-	-

No item 4.2.2, apresentado anteriormente, havia sido verificado que o processo utilizado no cálculo do índice topográfico resultava em diferenças significativas na curva de distribuição desses valores na bacia.

Os resultados aqui apresentados mostram que, na bacia em estudo, para um mesmo conjunto de parâmetros e dados de entrada do modelo, os picos de vazão aumentam significativamente para os Processos 1 e 2, em relação ao Processo 3, usado como referência. Além disso, a recessão e o escoamento de base ficam muito alterados quando a curva do Processo 2 é adotada.

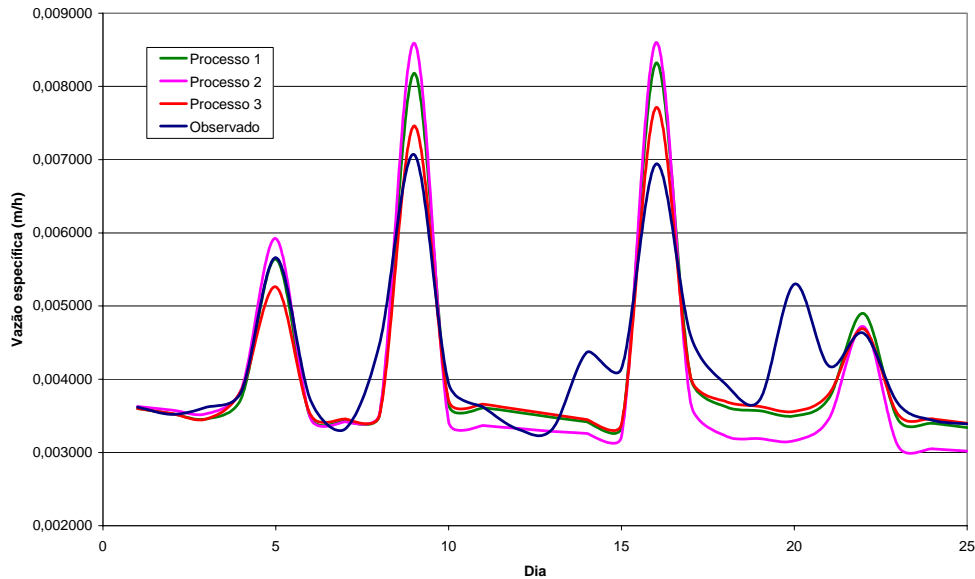


Figura 4.16: Hidrogramas Simulados para Diversos Processos de Cálculo do Índice Topográfico

Os valores do coeficiente de eficiência E de Nash e Sutcliffe, da soma dos erros quadráticos $F1$ e da soma dos erros absolutos $F2$ estão aqui apresentados apenas como indicativos da alteração provocada pelo processo de cálculo do índice topográfico e sua distribuição na bacia. Porém, indicam também que o Processo 2, na bacia do Mambucaba, está mais distante do Processo 3.

Esses resultados confirmam a importância de selecionar o processo mais preciso possível para o cálculo do índice topográfico e de sua distribuição na bacia.

O segundo aspecto analisado foi sobre o comportamento das curvas de distribuição do índice topográfico obtidas para diversas áreas de contribuição dentro da própria bacia do rio Mambucaba, além de Fazenda Fortaleza (área de drenagem de 597 km^2), usada para calibração e validação do modelo. Assim, foram calculadas as distribuições para outras quatro áreas: Fazenda das Garrafas ($22,4 \text{ km}^2$); Área Sul ($50,8 \text{ km}^2$); Área Norte (328 km^2); e Vila Mambucaba (736 km^2). Esta última abrange toda a bacia hidrográfica do rio Mambucaba.

As curvas de distribuição do índice topográfico, todas calculadas pelo processo do TauDEM, ficaram muito semelhantes para as cinco áreas consideradas, conforme apresentado anteriormente no item 4.2.2.

Num exercício de abstração, em substituição à curva de distribuição de Fazenda Fortaleza, cada uma das curvas foi introduzida no modelo TOPMODEL calibrado e foram simuladas as vazões do rio Mambucaba. Com isso, pretendeu-se avaliar a variação do

hidrograma com as diferenças da curva de distribuição do índice topográfico, mesmo que pequenas.

É importante esclarecer que o programa TMOD9502 trabalha com vazões específicas, de modo que a grandeza das áreas de drenagem não influenciou os hidrogramas, mas apenas a diferença entre as curvas de distribuição do índice topográfico. A Figura 4.17 e o Quadro 4.8 a seguir apresentam os resultados obtidos.

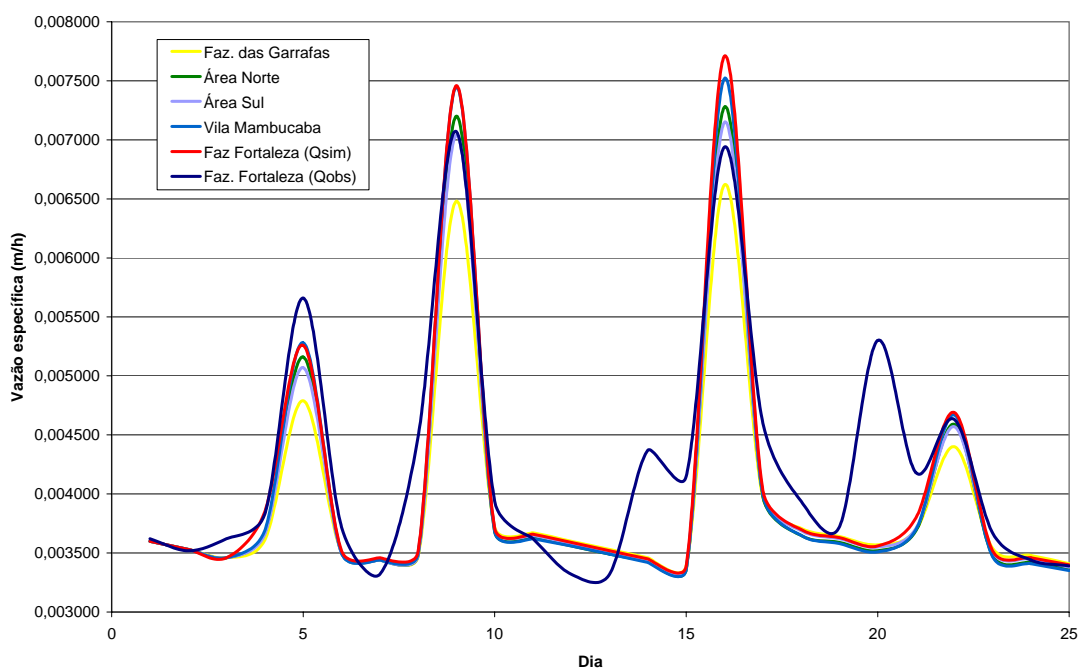


Figura 4.17: Hidrogramas Simulados com as Curvas de Distribuição do Índice Topográfico das Sub-bacias do Rio Mambucaba

Quadro 4.8: Resultados da Simulação com Curvas de Distribuição das Sub-bacias

Sub-bacia	λ	Q_{med} (m/h)	Q_{max} (m/h)	Q_{min} (m/h)	E	$F1$	$F2$
Faz. Das Garrafas	6,58	0,0039	0,0066	0,0034	0,70	0,0000077	9,1%
Área Sul	6,73	0,0039	0,0072	0,0034	0,73	0,0000069	8,0%
Área Norte	6,69	0,0040	0,0073	0,0034	0,72	0,0000071	8,3%
Vila Mambucaba	6,77	0,0040	0,0075	0,0034	0,71	0,0000074	8,7%
Faz. Fortaleza (sim)	6,77	0,0039	0,0076	0,0034	0,72	0,0000071	8,5%
Faz. Fortaleza (obs)	-	0,0042	0,0071	0,0033	-	-	-

Apesar de ser uma abstração, essa análise permite observar o efeito da curva de distribuição do índice topográfico no modelo TOPMODEL, para a bacia em estudo. Obviamente, o modelo para ser utilizado na simulação de vazões em cada sub-bacia deveria

ter sua calibração revista, de modo que um novo conjunto de parâmetros poderia tornar o modelo ainda mais eficiente para qualquer das áreas de contribuição estudadas.

No entanto, pode-se verificar que, de modo diverso dos processos de cálculo do índice topográfico, as diferenças nas curvas de distribuição não alteraram a forma do hidrograma. A recessão e a estiagem ficaram muito semelhantes, sendo que apenas os picos tiveram uma variação maior. Mesmo assim, a maior diferença ficou por conta da sub-bacia de Fazenda das Garrafas, localizada na parte mais alta da bacia e com a menor área de drenagem (22,4 km²).

Esse resultado evidencia a forte homogeneidade da bacia do rio Mambucaba quanto ao índice topográfico e, provavelmente, quanto ao comportamento hidrológico, com uma diferenciação mais marcante apenas em relação apenas em relação às sub-bacias de cabeceiras.

O terceiro aspecto analisado foi a influência da resolução adotada para obtenção do modelo numérico de terreno da bacia na simulação das vazões. Para isso, foram comparados os resultados obtidos, para a bacia do rio Mambucaba até Fazenda Fortaleza, segundo quatro resoluções do MNT: 25m, 50m, 75m e 100m. Aos quatro modelos numéricos de terreno foi aplicado o Processo 3, que utiliza o programa TauDEM, para cálculo do índice topográfico

O modelo TOPMODEL foi calibrado com a curva de distribuição do índice topográfico obtida com o MNT com resolução de 50m. Cada uma das outras três curvas foi introduzida no modelo calibrado, em substituição à curva do MNT de 50m e foram simuladas as vazões em Fazenda Fortaleza. A Figura 4.18 e o Quadro 4.9 a seguir apresentam os resultados obtidos.

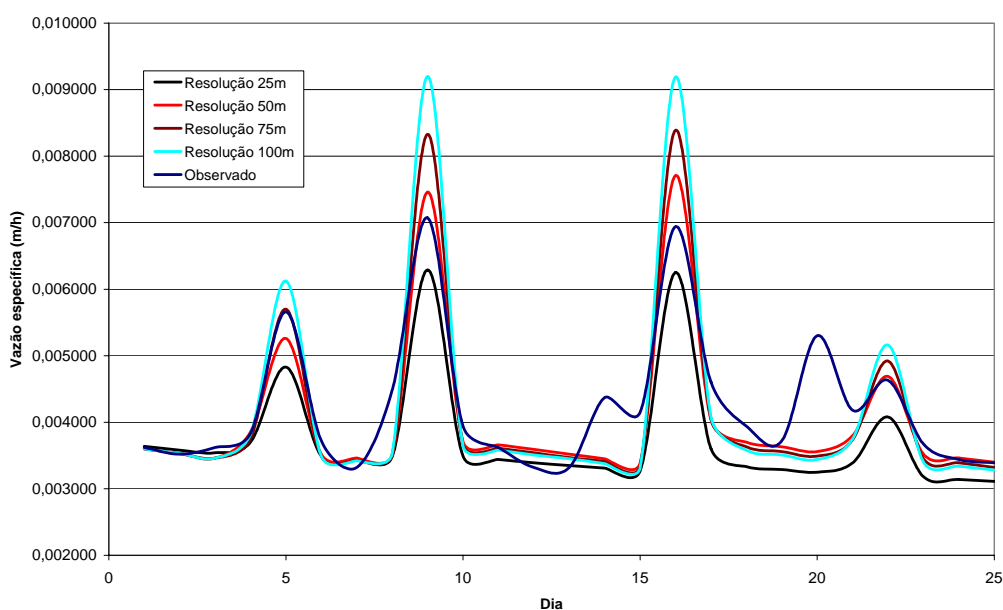


Figura 4.18: Hidrogramas Simulados para Diversas Resoluções do MNT

Quadro 4.9: Resultados da Simulação para Diversas Resoluções do MNT

Resolução	λ	<i>Q med</i> (m/h)	<i>Q max</i> (m/h)	<i>Q min</i> (m/h)	<i>E</i>	<i>F1</i>	<i>F2</i>
25m	6,42	0,0037	0,0063	0,0031	0,53	0,0000121	12,5%
50m	6,77	0,0040	0,0077	0,0034	0,72	0,0000071	8,5%
75m	7,05	0,0041	0,0084	0,0033	0,59	0,0000105	10,2%
100m	7,30	0,0042	0,0092	0,0033	0,33	0,0000171	12,6%
Observado	-	0,0042	0,0071	0,0033	-	-	-

Mais uma vez, os valores do coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe *E*, da soma dos erros quadráticos *F1* e da soma dos erros absolutos *F2* estão aqui apresentados apenas como indicativos da alteração provocada pela resolução do MNT. Para cada uma das curvas de distribuição obtidas para as resoluções de 25m, 75m e 100m seria possível realizar uma calibração que minimizasse esse efeito, obtendo um modelo mais eficiente. Constata-se, então, que a resolução do MNT influencia na calibração do modelo e no melhor conjunto de valores para os parâmetros.

Havia sido verificado, anteriormente no item 4.2.2, que a resolução adotada para a geração do modelo numérico de terreno tinha forte influência na curva de distribuição do índice topográfico na bacia. No caso da bacia do rio Mambucaba até Fazenda Fortaleza, a mudança de resolução do MNT cria uma defasagem da curva acumulada de tal modo que para um mesmo percentual de área o índice topográfico aumenta com o tamanho da célula do MNT.

Os resultados agora apresentados reforçam essa análise. Na bacia em estudo, para um mesmo conjunto de parâmetros e dados de entrada do modelo, os picos de vazão aumentam diretamente com o tamanho da célula do MNT. Esse resultado já era esperado, tendo em vista que o índice topográfico representa a tendência de um determinado ponto da bacia desenvolver condições saturadas. Se a tendência é maior, o escoamento superficial também.

Esses resultados reafirmam, também, a importância de escolher a melhor resolução possível para geração do MNT a ser usado no cálculo do índice topográfico e de sua distribuição na bacia. E no caso de uma regionalização, os resultados evidenciam a necessidade de se trabalhar sempre com uma mesma resolução, aquela empregada na criação dos elementos regionais.

CAPÍTULO 5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O emprego do modelo TOPMODEL em condições brasileiras típicas

Em 1996, quando Mine e Clarke aplicaram o TOPMODEL na bacia hidrográfica do rio Belém até a estação fluviométrica de Prado Velho, com área de 42 km², o maior número de aplicações do modelo havia sido em pequenas bacias rurais, com áreas inferiores a 10 km², e bem monitoradas. O objetivo daquele trabalho era explorar o potencial do modelo e verificar a viabilidade de futuras aplicações, adaptando-o às condições brasileiras, caracterizadas pela escassez de informações. Em termos globais, o ajuste não foi considerado satisfatório, entre outros, pelos seguintes fatores: a baixa resolução (grade de 250m) dos dados de elevação usados para a derivação da distribuição do índice topográfico; a grande área de drenagem e impermeabilização da bacia; e a baixa correlação entre chuva e vazão de alguns períodos analisados.

Desde essa época, algumas aplicações do TOPMODEL foram realizadas em bacias de maior porte. Em 2000, Schuler et al. aplicaram o modelo nas cabeceiras do rio Corumbataí, para uma sub-bacia de 59 km². No mesmo ano, o modelo foi aplicado na bacia do rio Descoberto, por Varella e Campana, em uma área de drenagem de 114 km². Em 2002, Xavier fez uma aplicação do TOPMODEL em uma área de 253 km² da bacia do rio Iguaçu (RJ). Nesses trabalhos, foram utilizados dados horários de precipitação e nível d'água, obtidos de postos com registradores.

A bacia do rio Mambucaba até o posto Fazenda Fortaleza tem 597 km² de área de drenagem, portanto, uma dimensão maior que o dobro da área do rio Iguaçu (RJ). Uma indagação a ser respondida, no início do trabalho, era se o modelo TOPMODEL conseguiria representar adequadamente uma área com essa dimensão.

Por outro lado, não havia dados horários disponíveis que pudessem ser utilizados para calibração e validação do modelo. O tempo de concentração da bacia a ser modelada foi estimado em apenas 6 horas, de modo que a utilização dos dados diários disponíveis resultaria em maior dificuldade para calibração. Essa era a segunda indagação: seria possível vencer essa restrição?

Além disso, a bacia do Mambucaba não tem nenhuma estação climatológica, de modo que os dados de evapotranspiração potencial seriam obtidos na estação mais próxima, localizada no mesmo município, mas ao nível do mar. Porém, a bacia hidrográfica do rio Mambucaba até Fazenda Fortaleza tem uma altitude média de 1250 m, ficando a altitude máxima em torno de 2080m e o exutório a uma altitude de 130 m. Os registros diários da

estação climatológica mais próxima foram utilizados no cálculo da evapotranspiração potencial, pelo método de Penman, mas precisaria ser aplicado um fator de correção para torná-los representativos da área em estudo, devido à distância e, principalmente, a diferença de altitude.

Curiosamente, essas dificuldades e incertezas remetem ao objetivo do trabalho de Mine e Clarke realizado dez anos antes: explorar o potencial do modelo e verificar a viabilidade de futuras aplicações, adaptando-o às condições brasileiras caracterizadas pela escassez de informações.

Considerou-se, então, que a calibração para a bacia do Mambucaba só seria válida se os valores dos parâmetros do modelo calibrado estivessem rigorosamente dentro dos limites definidos anteriormente na bibliografia (vide Quadro 4.5).

Apesar das restrições citadas, e respeitando os limites estabelecidos para os parâmetros, o modelo TOPMODEL foi calibrado para a bacia do rio Mambucaba com o coeficiente de eficiência do modelo E , de Nash e Sutcliffe, calculado como 0,72, em um período de 25 dias usado para calibração. Na simulação para o período de validação do modelo, com extensão de 87 dias, o coeficiente de eficiência foi calculado como 0,54.

Varella e Campana (2000) concluíram que o coeficiente de eficiência, mais do que um índice da qualidade global do ajuste, quantifica o desvio entre as vazões calculadas e observadas, representando a capacidade do modelo de reproduzir a forma do hidrograma.

Quanto mais próximo o coeficiente de Nash e Sutcliffe estiver de 1, maior é a eficiência do modelo na previsão das vazões. Valores de eficiência negativos indicariam a inadequação do modelo. Iorgulescu et al (1994) consideraram que coeficientes de eficiência superiores a 0,7 são indicativos de alta eficiência do modelo.

Diante disso, considera-se que as duas primeiras indagações foram respondidas. O modelo TOPMODEL pode representar adequadamente áreas de maior porte, em torno de 600 km². Com essas dimensões, a disponibilidade de dados exclusivamente diários não é um impeditivo para aplicação do modelo, ainda que seja uma fonte de incertezas, que afeta também a aplicação de qualquer outra modelagem hidrológica.

O emprego do modelo TOPMODEL às bacias litorâneas fluminenses

Outro objetivo do trabalho era investigar se o modelo poderia ser aplicado adequadamente às bacias hidrográficas litorâneas, de modo geral, e em especial as do litoral fluminense. A questão agora é que as bacias litorâneas são de pequeno e médio porte e os locais de interesse, quanto ao conhecimento sobre o comportamento hidrológico, com

freqüência controlam áreas muito menores que 600 km². Nesses casos, a ausência de dados hidrometeorológicos horários torna-se uma limitação quase intransponível.

Recentemente, foi realizado um estudo sobre regionalização de vazões na Sub-bacia 59 - Bacias Litorâneas do Estado do Rio de Janeiro, e mais dois especificamente na baía da Ilha Grande. As dificuldades apontadas nas conclusões desses estudos indicavam a escassez de dados pluviométricos e fluviométricos como uma forte limitação para a regionalização de variáveis hidrológicas.

A rede hidrometeorológica tem poucos postos registradores e sua distribuição espacial não é uniforme, muito pelo contrário, está concentrada em algumas áreas (vide Figuras 3.2 e 3.3).

A solução mais adequada, sem dúvida, é: o adensamento da rede de monitoramento; a adequação dos postos, com a instalação de registradores de chuva e níveis d'água nos locais necessários; e a espera de um tempo mínimo necessário para geração de uma série histórica de registros representativa. Porém, a rede com registradores é cara, o que dificulta muita a sua expansão.

Por outro lado, as solicitações de outorga para abastecimento de água e lançamento de efluentes, público e industrial, e os pedidos de autorização para ocupação das margens dos cursos d'água exigem respostas rápidas e precisas, cujos erros têm como consequência danos ambientais.

Segundo Tucci (2002), a variabilidade das condições hidrológicas é um processo estocástico no tempo e no espaço, que depende da combinação de vários fatores como: precipitação; evapotranspiração; relevo; geologia; geomorfologia; solos; cobertura vegetal e uso do solo; e atividades antrópicas sobre o sistema fluvial. Esse grande conjunto de fatores transforma a estimativa das variáveis hidrológicas num problema complexo *dependente das estatísticas de valores conhecidos*.

Varella & Campana (2000) haviam sinalizado que seria desejável que se trabalhasse a bacia da forma mais distribuída possível, dividindo-a em sub-bacias que apresentem maior homogeneidade em termos de cobertura de solo e tirando-se maior proveito das técnicas de geoprocessamento.

Ao longo da presente dissertação, buscou-se compilar informações disponíveis que permitissem o aprofundamento do conhecimento sobre as bacias litorâneas e pudessem explicar a distribuição espacial de vazões. Constatou-se que, para todas as bacias litorâneas fluminenses, estão disponíveis, por exemplo, o Mapa de Solos do Estado do Rio de Janeiro

(Embrapa Solos, 2006) e o Mapa de Uso e Cobertura das Terras do Rio de Janeiro (CPRM, 2001).

Extraídas as informações desses mapas para a bacia do rio Mambucaba até o posto Fazenda Fortaleza (Figuras 3.10 e 3.11), verificou-se que aproximadamente 496 km² estão cobertos por mata, o que equivale a 83% da área de contribuição, e apresentam Cambissolos em diversas associações em cerca de 560 km², o equivalente a 94% da área.

Superpondo os dois mapas, pode-se observar, no entanto, a maior concentração de uso do solo para pastagem e área rural nas áreas com Latossolos Vermelho-Amarelo associados a Cambissolos. Essas áreas estão localizadas no extremo norte da bacia em altitudes superiores a 1450m. Em termos hidrológicos, pode-se delinear, então, uma região de comportamento diferenciado, que deveria ser monitorada para caracterização da distribuição espacial das vazões. Além disso, como as áreas de contribuição são pequenas, em torno de 30 km², o monitoramento deve incluir registradores de chuva e nível d'água, que permitam a obtenção de dados horários para caracterização adequada do comportamento hidrológico.

Nessa região, está localizado o posto fluviométrico Fazenda das Garrafas, que controla uma área de 22,4 km², o posto de menor área de drenagem entre os que foram utilizados no recente estudo de regionalização de vazões das bacias litorâneas. Porém, a inexistência de registrador de nível d'água impossibilita o conhecimento sobre a forma dos hidrogramas, o que gera um alto grau de incerteza sobre os picos de vazão e, conseqüentemente, as vazões médias também.

O emprego de técnicas de geoprocessamento em estudos de distribuição espacial de vazões

No decorrer do presente trabalho, foi realizada uma pesquisa sobre ferramentas desenvolvidas para ambientes de sistemas de informações geográficas, que facilitassem e agilisassem a aplicação de modelos matemáticos distribuídos ou semi-distribuídos, como o TOPMODEL, que utilizam modelos digitais de terreno. Verificou-se que o uso de *softwares* como o ArcGIS, desenvolvido pelo Environmental Systems Research Institute – ESRI, e de programas como o TauDEM, desenvolvido na Utah State University (USA), agilizam o cálculo do índice topográfico e o conhecimento sobre sua distribuição na bacia.

Além disso, tem ocorrido uma rápida evolução nos recursos de geoprocessamento e também na disponibilização de dados dessa natureza. Como exemplo, o projeto SRTM, que disponibilizou, através do USGS e EDC, dados topográficos digitais (MDT) correspondentes a aproximadamente 80% da superfície terrestre, inclusive a totalidade da América do Sul, com

uma resolução de aproximadamente 90 metros. Existem pesquisas em andamento sobre processos que permitam a obtenção de MDT com resoluções de 30, 45 e 60m, a partir dos dados do projeto SRTM.

Usualmente, a única informação extraída das características do relevo para os estudos de regionalização é a área de drenagem dos postos fluviométricos, utilizada como variável explicativa. No entanto, Silva Júnior et al (2003) concluíram que não pode ser descartada a necessidade da análise do ganho estatístico da correlação entre a variável dependente e outras variáveis explicativas, tais como: a precipitação, a densidade de drenagem e a declividade. O importante é ter a consciência de que nenhum tipo de dado pode ser inventado, o que se deve é buscar da melhor maneira possível extrair *o máximo de informações dos dados existentes* e, utilizá-las com suas devidas ressalvas.

O uso de técnicas de geoprocessamento, em especial do modelo digital do terreno, permite a apropriação de informações do relevo, estreitamente relacionadas com as variáveis hidrológicas e sua distribuição espacial. Essas informações não são pontuais, como os postos hidrometeorológicos, pelo contrário, formam uma superfície, estando disponíveis para todas as bacias e sub-bacias independente do tamanho da área de contribuição.

Na conceituação do modelo TOPMODEL, é utilizado o índice topográfico proposto por Kirkby em 1975, que relaciona a área de contribuição da bacia até determinado ponto com a declividade do terreno nesse local. O índice topográfico representa a tendência de um determinado ponto da bacia desenvolver condições saturadas, caracterizando também a similaridade hidrológica. Na conceituação do modelo, todos os pontos com o mesmo valor de índice topográfico apresentam o mesmo comportamento hidrológico.

Em estudos da distribuição espacial das vazões, o índice topográfico pode ser uma variável mapeada que permita a identificação de áreas com comportamento diferenciado em função do relevo. Para isso, poderia ser utilizado o índice topográfico médio ou a curva de distribuição do índice topográfico da bacia. No segundo caso, à semelhança da curva de permanência de vazões nos estudos de regionalização, a curva de distribuição poderia ser representada por vários valores associados à frequência e relacionados com condições médias, máximas e mínimas de saturação da bacia (por exemplo, 50%, 90% e 10%, respectivamente).

Por representar a tendência em desenvolver condições saturadas, espera-se que o índice topográfico apresente melhor correlação com eventos de cheia. No entanto, uma maior capacidade de escoamento durante os eventos chuvosos tem como consequência uma menor

capacidade de regularização natural da bacia, de modo que não se pode descartar a possibilidade de obter razoável correlação com as vazões durante a estiagem.

Neste trabalho, foram utilizados, para cálculo do índice topográfico, os dados altimétricos da região da bacia hidrográfica do rio Mambucaba, disponíveis em meio digital na escala 1:50.000, que foram importados para um ambiente ArcGIS. No entanto, para toda a área das bacias litorâneas fluminenses, existem cartas IBGE nessa mesma escala, exigindo apenas a digitalização das curvas de nível e hidrografia. Além disso, poderia ser investigada a utilização dos dados disponibilizados pelo projeto SRTM na obtenção do cálculo do índice topográfico.

Contudo, pelos resultados obtidos no presente trabalho, alguns cuidados são fundamentais para um estudo de distribuição espacial das vazões que utilize o índice topográfico como variável explicativa.

O primeiro cuidado é a escala da planta topográfica, que deve ser a mesma para toda a área abrangida pelo estudo de regionalização. No caso das bacias litorâneas fluminenses, se fossem utilizadas cartas topográficas, poderiam ser as do IBGE na escala 1: 50.000.

O segundo fator é a resolução utilizada para geração do MNT (*raster*), que também deve ser a mesma para toda a área de estudo. Observou-se no presente trabalho que a resolução do MNT acarretou uma sensível alteração na distribuição do índice topográfico na bacia do rio Mambucaba, conforme já havia sido constatado em aplicações anteriores. Os valores médios do índice topográfico aumentaram com a dimensão da célula usada para geração do MNT.

Além disso, a resolução do MNT deve ser igual ou melhor que 50m, o que remete ao terceiro aspecto: o processo utilizado para cálculo do índice do topográfico e sua curva de distribuição. Pelo menos uma dificuldade encontrada por Mine e Clarke, dez anos atrás, na aplicação do TOPMODEL não existe mais.

A obtenção de uma matriz de elevação do terreno de toda a bacia, para ser usada como dados de entrada de um programa para cálculo do índice topográfico, sem o uso de ferramentas de ambiente GIS, era muito lenta. Isso acabava resultando na baixa resolução (grade de 250m) dos dados de elevação usados para derivação da distribuição do índice topográfico, numa bacia com 42km².

A par do avanço nas ferramentas e nos dados disponibilizados, o cuidado na utilização do índice topográfico para estudos de distribuição espacial de vazões deve ser o de adotar o

mesmo processo de cálculo e derivação da curva de distribuição para toda a área a ser regionalizada.

Os resultados obtidos na presente dissertação indicam uma boa perspectiva para o uso do índice topográfico em estudos de regionalização de vazões, em especial como variável explicativa das vazões. No entanto, devendo ser atendidas, entre outras, as seguintes condições recomendadas por Tucci (2002):

- as variáveis explicativas devem ser facilmente determinadas pelo usuário da regionalização, pois caso contrário a metodologia dificilmente será utilizada;
- na determinação das variáveis explicativas, devem ser evitados métodos indiretos com muitas incertezas;
- na introdução de uma nova variável explicativa, verificar se haverá significativo aumento de informação, pois muitas variáveis explicativas possuem forte correlação entre si;
- a regionalização deverá fornecer metodologia de estimativa da variável explicativa nas diversas áreas em que a regionalização for válida e puder ser aplicada.

A distribuição espacial de outras variáveis ambientais

O esforço em disponibilizar um sistema de informações geográficas com dados sobre declividade dos terrenos e da rede de drenagem, para as bacias litorâneas fluminenses, pode ser útil também em estudos de outras disciplinas, além de hidrologia, tais como vegetação e biota aquática. Outro exemplo é o planejamento de ações de emergência na ocorrência de acidentes que envolvam poluentes. As inúmeras estradas e dutos transportadores de óleo que atravessam as bacias litorâneas trazem um risco potencial ao meio ambiente, no caso de acidentes. A disponibilização de um sistema de informações geográficas com dados sobre declividades e linhas preferenciais de escoamento pode orientar as ações de contingência durante essas situações críticas. Conforme destacaram Mendes e Cirilo (2001), *o rio é o destino final da trajetória da água na bacia hidrográfica. Segundo esta ótica, é também o reflexo de qualquer ação que ocorra, e que altere de forma significativa o equilíbrio natural do território. O rio pode ser considerado um indicador do estado de equilíbrio da área drenada, caracterizando o nível de sustentabilidade (ou não) da região.*

No Estado do Rio de Janeiro, apesar do porte reduzido das áreas de contribuição das bacias litorâneas, nessa área estão localizados: toda a Região Metropolitana do Rio de Janeiro; cidades de grande atividade econômica, como Macaé e Itaguaí; cidades de destacado interesse turístico, como Angra dos Reis e Búzios; e empreendimentos energéticos de interesse

nacional, como a Usina Nuclear de Angra, da Eletronuclear, e a refinaria de petróleo de Duque de Caxias, da Petrobrás.

Por outro lado, por serem cobertas pela Mata Atlântica, em estágios diferentes de preservação, as áreas altas das bacias litorâneas são consideradas de grande importância ambiental, uma vez que este bioma encontra-se ameaçado. A Constituição Federal (parágrafo 4º do art. 225) considera a Mata Atlântica como um patrimônio nacional, e sua utilização deverá ocorrer dentro de condições que assegurem a preservação do meio ambiente, inclusive quanto ao uso dos recursos naturais.

Num enfoque mais amplo, pode-se citar o fato de doze capitais de estados brasileiros estarem localizadas no litoral, sendo que a maioria delas ocupa áreas de bacias litorâneas de pequeno e médio porte. Isso evidencia que a necessidade de conhecer o comportamento hidrológico também em bacias de menor porte é fundamental para subsidiar a gestão dos recursos hídricos.

CAPÍTULO 6. CONCLUSÕES

A *Lei das Águas* (Lei Federal 9433/97) definiu seis instrumentos de implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos, entre eles, a Outorga dos Direitos de Uso dos Recursos Hídricos, que tem como objetivo assegurar o controle dos usos e o efetivo exercício dos direitos de acesso à água. Como parte do processo de outorga é necessário estimar uma grandeza fundamental: a vazão disponível.

O estabelecimento da Faixa Marginal de Proteção - FMP dos rios, pelos órgãos gestores, não tem sido citada entre os instrumentos de gestão, mas tem um papel importante como ordenador das ações antrópicas no entorno dos corpos d'água e de protetor das condições naturais da dinâmica fluvial. A definição da FMP dos cursos d'água depende da estimativa das vazões de cheia em cada local, para que possa ser preservada a calha fluvial e garantida a seção hidráulica necessária para a passagem dos volumes durante esses eventos.

No entanto, a densidade de postos fluviométricos é pequena e sua distribuição espacial é irregular, deixando algumas áreas sem qualquer informação hidrológica. Essas dificuldades estão presentes nas bacias litorâneas brasileiras, que abrigam doze capitais de estados, sendo que a maioria em bacias de pequeno e médio porte, evidenciando a necessidade de conhecer o comportamento hidrológico em bacias de pequeno e médio porte para subsidiar a gestão dos recursos hídricos.

No Estado do Rio de Janeiro, apesar do porte reduzido das áreas de contribuição das bacias litorâneas, nessa área estão localizados: toda a Região Metropolitana do Rio de Janeiro; cidades de grande atividade econômica, como Macaé e Itaguaí; cidades de destacado interesse turístico, como Angra dos Reis, Búzios e Paraty; e empreendimentos energéticos de interesse nacional, como a Usina Nuclear de Angra, da Eletronuclear, e a refinaria de petróleo de Duque de Caxias, da Petrobrás. Entre essas bacias, está a do rio Mambucaba até o posto Fazenda Fortaleza, com área de drenagem de 597 km², escolhida para aplicação do modelo hidrológico TOPMODEL, que foi empregado para simulação de vazões e, também, para avaliação da influência da distribuição do índice topográfico na bacia.

Os objetivos da presente dissertação foram definidos com o intuito de contribuir para a solução de algumas questões relacionadas com o uso adequado e a gestão dos recursos hídricos.

Um dos principais objetivos desta dissertação foi investigar se modelos matemáticos de simulação hidrológica que usam dados de precipitação e modelos digitais de terreno podem

ser aplicados adequadamente a bacias hidrográficas litorâneas. Na calibração do modelo TOPMODEL para a bacia do rio Mambucaba foi obtido um coeficiente de eficiência do modelo E , de Nash e Sutcliffe, de 0,72, em um período de 25 dias. Na simulação para o período de validação do modelo, com extensão de 87 dias, o coeficiente de eficiência foi calculado como 0,54. Quanto mais próximo o coeficiente de Nash e Sutcliffe estiver de 1, maior é a eficiência do modelo na previsão das vazões, sendo que coeficientes de eficiência superiores a 0,7 são indicativos de alta eficiência do modelo. A disponibilidade de dados exclusivamente diários, numa bacia de médio porte, não foi um impeditivo para aplicação do modelo, ainda que seja uma fonte de incertezas, que afeta também a aplicação de qualquer outra modelagem hidrológica.

Portanto, o presente trabalho permitiu confirmar que modelos matemáticos de simulação hidrológica que utilizam dados de precipitação e modelos digitais de terreno, como o TOPMODEL, podem ser aplicados adequadamente a bacias hidrográficas litorâneas de pequeno e médio porte.

Outro objetivo do estudo era pesquisar sobre ferramentas recentemente disponibilizadas, desenvolvidas para ambientes de sistemas de informações geográficas, que facilitem e agilizem a aplicação de modelos matemáticos distribuídos ou semi-distribuídos. A descrição da base conceitual do modelo TOPMODEL e também as suas aplicações no Brasil evidenciam a importância do índice topográfico como representante das condições de relevo das bacias hidrográficas modeladas. A definição da função de distribuição do índice topográfico na bacia mereceu destaque tendo sido aplicados vários métodos para o cálculo do índice topográfico e sua distribuição na bacia. Além do programa computacional GRIDATB, versão 95.01, escrito originalmente em 1983 e revisado em 1995, que utiliza a linguagem FORTRAN, foram aplicados outros processos. Em um segundo processo foi utilizado o algoritmo D8 e a extensão Arc Hydro Tools do software ArcGIS. E no terceiro processo, empregou-se o programa TauDEM, que utiliza o algoritmo D_{∞} e foi desenvolvido por David Tarboton na Utah State University (USA).

Verificou-se que o uso das duas ferramentas mais recentes não só agilizou o cálculo do índice topográfico e a definição de sua curva de distribuição na bacia hidrográfica, como viabilizou as investigações realizadas dentro dos prazos disponíveis em uma área muito maior (597 km^2) do que em outras aplicações anteriores no Brasil.

O terceiro objetivo do estudo foi investigar a possibilidade da utilização do índice topográfico, que relaciona a área de contribuição e a declividade do terreno em determinado ponto, como uma variável explicativa de estudos de regionalização de vazões. O índice

topográfico representa a tendência de um determinado ponto da bacia desenvolver condições saturadas, o que caracteriza a similaridade hidrológica. Usualmente, a única informação extraída das características do relevo e utilizada como variável explicativa para os estudos de regionalização é a área de drenagem dos postos fluviométricos. O uso de técnicas de geoprocessamento, em especial do modelo digital do terreno, permitiu a apropriação das informações do relevo da bacia do rio Mambucaba, estreitamente relacionadas com as variáveis hidrológicas e sua distribuição espacial. Essas informações não são pontuais, como os postos hidrometeorológicos, e estão disponíveis para toda a bacia e sub-bacias independente do tamanho da área de contribuição. Verificou-se que o índice topográfico pode ser uma variável mapeada que permitiria a identificação de áreas com comportamento diferenciado em função do relevo. Para isso, poderia ser utilizado o índice topográfico médio ou a curva de distribuição do índice topográfico da bacia. No segundo caso, à semelhança da curva de permanência de vazões nos estudos de regionalização, a curva de distribuição poderia ser representada por vários valores associados à frequência e relacionados com condições médias, máximas e mínimas de saturação da bacia.

Como o índice topográfico refere-se diretamente ao desenvolvimento de condições saturadas, espera-se que possa ser aplicado com sucesso em estudos de regionalização de cheias. Considerando, porém, que a maior capacidade de escoamento durante os eventos chuvosos tem como consequência uma menor capacidade de regularização natural da bacia, não se pode descartar a possibilidade de obter razoável correlação com a produção média da bacia ou com as vazões durante a estiagem.

Pelos resultados obtidos no presente trabalho, alguns cuidados são fundamentais para um estudo de distribuição espacial das vazões que utilize o índice topográfico como variável explicativa. O primeiro cuidado é a escala da planta topográfica, que deve ser a mesma para toda a área abrangida pelo estudo de regionalização. No caso das bacias litorâneas fluminenses, se fossem utilizadas cartas topográficas, poderiam ser as do IBGE na escala 1: 50.000. O segundo fator é a resolução utilizada para geração do MNT (*raster*), que deve ser igual ou melhor que 50m e, também, deve ser a mesma para toda a área de estudo. Observou-se no presente trabalho que a resolução do MNT acarretou uma sensível alteração na distribuição do índice topográfico na bacia do rio Mambucaba, conforme já havia sido constatado em aplicações anteriores. O terceiro cuidado na utilização do índice topográfico para estudos de distribuição espacial de vazões deve ser o de adotar o mesmo processo de cálculo e derivação da curva de distribuição para toda a área a ser regionalizada.

O quarto objetivo desta dissertação foi identificar outras informações disponíveis que, através do uso de sistemas de informações geográficas (SIG), também possam ser úteis no conhecimento sobre a distribuição espacial das vazões, considerando que os rios sofrem os reflexos das características naturais da bacia e de todas as ações que alteram de forma significativa o equilíbrio natural.

Uma informação identificada foi o projeto SRTM, que disponibilizou gratuitamente, através do USGS e EDC, modelos digitais de terreno (MDT) correspondentes a aproximadamente 80% da superfície terrestre, inclusive a totalidade da América do Sul, com uma resolução de aproximadamente 90 metros. Existem pesquisas em andamento sobre processos que permitam a obtenção de MDT com resoluções de 30, 45 e 60m, a partir dos dados gratuitos do projeto SRTM.

Identificou-se também que, para todas as bacias litorâneas fluminenses, estão disponíveis, por exemplo, o Mapa de Solos do Estado do Rio de Janeiro (Embrapa Solos, 2006) e o Mapa de Uso e Cobertura das Terras do Rio de Janeiro (CPRM, 2001). Superpondo os dois mapas, observou-se a maior concentração de uso do solo para pastagem e área rural nas áreas com Latossolos Vermelho-Amarelo associados a Cambissolos, localizadas no extremo norte da bacia em altitudes superiores a 1450m. Em termos hidrológicos, essa condição permite delinear uma região de comportamento homogêneo e diferenciado que deveria ser destacadamente monitorada. Além disso, como as áreas de contribuição são pequenas, em torno de 30 km², o monitoramento deveria incluir registradores de chuva e nível d'água, que permitam a obtenção de dados horários para caracterização adequada do comportamento hidrológico.

As bacias litorâneas fluminenses apresentam grande variabilidade espacial em seu comportamento hidrológico. O estudo realizado mostrou um caminho para o emprego do índice topográfico associado a outras informações de mapeamento disponíveis em qualquer região do estado, para estudos hidrológicos dessas bacias, através do uso de sistemas de informações geográficas (SIG). Como os mecanismos que dão origem a essa variabilidade podem ser percebidos melhor com o emprego do SIG, essa aplicação permitiria também a identificação das prioridades a serem seguidas para monitoramento futuro das bacias litorâneas.

CAPÍTULO 7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir da revisão bibliográfica e dos resultados obtidos no presente trabalho, as sugestões apresentadas neste capítulo se fundamentaram em duas premissas básicas:

- a topografia é um controle de primeira ordem na distribuição espacial das variáveis hidrológicas;
- a falta generalizada de dados hidrológicos de pequenas bacias hidrográficas no Brasil não pode ser suprida pela regionalização.

Em um ambiente GIS, seria útil um trabalho de superposição de informações disponíveis sobre: a rede em operação de monitoramento pluviométrico e fluviométrico (com ou sem registradores); as vazões características (médias, máximas e mínimas) registradas, inclusive nas estações desativadas; as isoietas de precipitação disponíveis; o tempo de concentração das bacias e sub-bacias; os solos; e a cobertura vegetal e uso do solo.

A partir dessa superposição, podem surgir resultados interessantes: a identificação de áreas prioritárias a serem monitoradas; a definição dos locais nos quais a instalação de registradores é essencial; a delimitação, em caráter preliminar, de regiões hidrológicas homogêneas.

Como estações com registradores são dispendiosas, sugere-se que seja analisada a possibilidade de instalar unidades *móveis* de monitoramento, pluviométrico e fluviométrico, para períodos de observação intensiva. Os equipamentos registradores permaneceriam durante um ano hidrológico em uma determinada bacia e poderiam ser deslocados, após esse período, para outra bacia ou sub-bacia, de forma alternada, um ano sim e outro não. Nos anos de ausência do monitoramento com registrador, seriam mantidas as observações diárias. A intenção, nesse caso, é estabelecer um padrão de comportamento das chuvas e vazões, que poderia ser analisado em conjunto com outras características espacializadas de cada bacia.

Esse procedimento permitiria a apropriação de um volume maior de informações, em um tempo menor, tendo em vista a restrição de recursos financeiros limitados. Além disso, uma rede de observação hidrometeorológica com distribuição espacial adequada e registro contínuo, operando durante um ano hidrológico, permitiria a verificação das regiões homogêneas definidas preliminarmente. Abriria, também, a possibilidade de uma melhor aplicação de modelos hidrológicos, entre outros, o TOPMODEL, para melhor conhecimento dos processos hidrológicos.

De modo geral, sugere-se que sejam realizados novos estudos da distribuição espacial de vazões, em especial nas bacias litorâneas da região Sudeste, utilizando ao máximo as informações topográficas, já que elas estão disponíveis de forma homogênea em toda a região. A disponibilização de modelos digitais de terreno, obtidos de forma semelhante para toda a região das bacias litorâneas, seria um recurso útil para estudos hidrológicos e, indiretamente, na gestão dos recursos hídricos, mas também em diversas outras disciplinas das ciências ambientais.

Nesse contexto, estudos de processamento dos dados disponibilizados pelo projeto SRTM para obter o modelo digital de terreno em resoluções melhores, próximas a 45m, parecem bastante promissores.

Independente da disponibilização do modelo digital de terreno para toda a região, sugere-se que sejam realizados estudos de derivação da curva de distribuição do índice topográfico em outras bacias e sub-bacias litorâneas, de modo a avaliar seu comportamento espacial e sua ligação com as características hidrológicas de cada local.

Outra sugestão é a realização de estudos de regionalização de vazão que avaliem a distribuição do índice topográfico como variável explicativa das variáveis hidrológicas regionalizadas.

Tendo em vista que as dificuldades relativas à obtenção do modelo de elevação do terreno e de derivação da curva de distribuição do índice topográfico vem sendo minimizadas, sugere-se que o modelo TOPMODEL seja aplicado em outras bacias e sub-bacias litorâneas, de modo a avaliar o comportamento dos parâmetros do modelo e do próprio índice topográfico. Seria interessante que essas aplicações abrangessem bacias de porte variado, lembrando que as áreas de pequeno porte necessitam da disponibilidade de dados horários, e que fossem também associadas a mapeamentos de solos, cobertura vegetal e uso do solo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACREMAN, M. C.; SINCLAIR, C. D. (1986). *Classification of Drainage Basins According to their Physical Characteristics: an Application for Flood Frequency Analysis in Scotland*. Journal of Hydrology, 84: 365-380.

ANA – Agência Nacional de Águas (2005). *Caderno Sobre Disponibilidade e Demandas de Recursos Hídricos no Brasil* (maio de 2005).

ANA – Agência Nacional de Águas (2002). *Plano Nacional de Recursos Hídricos - Documento Básico de Referência* (novembro de 2002).

ARAÚJO FILHO, P. F.; CABRAL, J. J. S. P.; ANTONINO, A. C. D.; SAULNIER, G. (2005). *Modelagem Hidrológica da Bacia do Rio Riacho Gameleira (Pernambuco) utilizando TOPSIMPL, uma Versão Simplificada do Modelo TOPMODEL RBRH*, vol. 10, n. 2, pp. 61-72, abr-jun 2005.

ARTEIRO, FRANCISCO (2005). *Influência dos Aspectos Socioambientais e de Usos Múltiplos da Água na Operação de Usinas Hidrelétricas e seus Reflexos nas Comunidades Envolvidas*. Workshop sobre a Influência dos Aspectos Socioambientais na Operação do Sistema Interligado Nacional (Brasília, julho de 2006).

BARROS, R. S.; CRUZ, C. B. M.; REIS, R. B.; COSTA JÚNIOR, N. A. (2005). *Avaliação do modelo digital de elevação do SRTM na ortorretificação de imagens Landsat 7 – Área de aplicação: Angra dos Reis – RJ*. Anais do XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia, abril 2005, p. 3997-4004.

BEVEN, K. J. (2001) *Rainfall-Runoff Modelling – The Primer*. John Wiley & Sons Ltd. England.

BEVEN, K. J.; KIRKBY, M.J. (1979) *A Physically Based, Variable Contributing Area Model of Catchment Hydrology*. Hydrology Sciences-Bulletin 24; 43-69.

BEVEN, K. J.; KIRKBY, M.J.; SCHOFFIELD, N.; TAGG, A. (1984) *Testing a Physically-based Flood Forecasting Model (TOPMODEL) for Three UK Catchments*. Journal of Hydrology 69; 119-143.

BEVEN, K. J.; LAMB, P.; QUINN, P.; ROMANOWICZ, R.; FREER J. (1995) *Chapter 18: TOPMODEL*. In: SINGH, V. P. (Editor) . *Computer Models of Watershed Hydrology*. Louisiana: Water Resources Publications.

BRASIL (1934). *Lei 24.643, de 10 de junho de 1934, que institui o Código de Águas*.

BRASIL (1997). *Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997*, que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos e cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos e dá outras providências.

BRASIL (2006). *Plano Nacional de Recursos Hídricos*. Aprovado pelo Conselho Nacional de Recursos Hídricos em 3 de março de 2006.

CARVALHO, W. A.; PANOSO, L. A.; PFEIFER, R. M.; ROSSI, M. (1990). *Levantamento de Reconhecimento Detalhado dos Solos do Parque Estadual da Serra do Mar – Núcleo Cunha, SP (Bacia “D”)*. Revista do Instituto Florestal, v. 2, n. 2, p. 127-55, dezembro de 1990 apud RANZINI, M. RIGHETTO, A. M. GUANDIQUE, M. E. G. MORAES, J. M. ARCOVA, F. C. S. CICCIO, V. (2004). *Modelagem hidrológica de uma microbacia florestada da Serra do Mar*, SP. RBRH, vol. 9, n.4, pp. 33-44.

CICCIO, V. de; ARCOVA, F. C. S.; SHIMOMISHI, P. Y.; FUJIEDA, M (1986/88). *Interceptação das Chuvas por Floresta Natural Secundária de Mata Atlântica – SP*. Silvicultura em São Paulo, v. 20-22, p. 25-30, 1986/88 apud RANZINI, M. RIGHETTO, A. M. GUANDIQUE, M. E. G. MORAES, J. M. ARCOVA, F. C. S. CICCIO, V. (2004). *Modelagem hidrológica de uma microbacia florestada da Serra do Mar*, SP. RBRH, vol. 9, n.4, pp. 33-44.

CICCIO, V. de; FUJIEDA, M (1992). *Pesquisa em Manejo de Bacias Hidrográficas em São Paulo*. Revista do Instituto Florestal, v.(4 único), p. 808-815, março de 1992 apud RANZINI, M. RIGHETTO, A. M. GUANDIQUE, M. E. G. MORAES, J. M. ARCOVA, F. C. S. CICCIO, V. (2004). *Modelagem hidrológica de uma microbacia florestada da Serra do Mar*, SP. RBRH, vol. 9, n.4, pp. 33-44.

CLEARY, R. (1989). *Capítulo 5: Águas Subterrâneas*. In: ABRH. *Engenharia Hidrológica*. Rio de Janeiro: ABRH/ Editora da UFRJ.

CONAMA (1986). *Resolução nº 020, de 18 de junho de 1986*, que dispõe sobre a classificação das águas doces, salobras e salinas do Território Nacional (revogada pela Resolução nº 357, de 17 de março de 2005).

CONAMA (2005). *Resolução nº 357, de 17 de março de 2005*, que dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes.

CPRM – Serviço Geológico do Brasil (2001). *Mapa de Solos*, Rio de Janeiro, novembro de 2001.

CPRM – Serviço Geológico do Brasil (2002). *Relatório Síntese do Trabalho de Regionalização de Vazões da Sub-bacia 59*, São Paulo, novembro de 2002.

DNEMET (1992). *Normais Climatológicas - Série 1961/1990*. Departamento Nacional de Meteorologia. Brasília, maio de 1992.

FEEMA – Fundação Estadual de Engenharia do Meio Ambiente (1978). *Vazões Mínimas dos Principais Cursos de Água do Estado do Rio de Janeiro*.

FERREIRA, L. (2004) *Simulação Hidrológica utilizando o Modelo TOPMODEL em Bacias Rurais, Estudo de Caso na Bacia do Ribeirão dos Marins – Seção Monjolinho (SP)*. 205 p. Tese de Doutorado em Engenharia Agrícola da Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.

FRANCHINI, M.; WENDLING, J.; OBLED, C.; TODINI, E. (1996) *Physical interpretation and sensitivity analysis of the TOPMODEL*. Journal of Hydrology, v. 175, p.293-338, 1996.

FRANCISCO, C. N. (2004). *Subsídios à Gestão Sustentável dos Recursos Hídricos no Âmbito Municipal: o Caso de Angra dos Reis, RJ*. Niterói: Instituto de Química/UFF. 158 p. Tese de Doutorado em Geociências do Programa de Pós-Graduação em Geociências da Universidade Federal Fluminense. 2004.

FUJEDA, F.; KUDOH, T.; CICCIO, V.; CARVALHO, J. L. (1997). *Hydrological Processes at Two Subtropical Forest Catchments: the Serra do Mar, São Paulo, Brazil*. Journal of Hydrology, 196: 26-46.

GOLDENFUM, J. A. (2003). *Pequenas Bacias Hidrológicas: Conceitos Básicos*. In: PAIVA, J. B. D. & PAIVA, E. M. C. D. (Organizadores). *Hidrologia Aplicada à Gestão de Pequenas Bacias Hidrográficas*. Porto Alegre: ABRH, 2003.

GRHIP - Grupo de Estudos de Hidrologia e Planejamento de Recursos Hídricos (2006). *Estudos Relativos a Estimativas de Vazões $Q_{7,10}$ na Bacia Hidrográfica da Baía da Ilha Grande (RJ)*. Universidade do Estado do Rio de Janeiro.

GÜNTNER, A.; SEIBERT, J.; UHLENBROOK, S. (2004) *Modeling Spatial Patterns of Saturated Areas: an Evaluation of Different Terrain Indices*. Water Resources Research, 40, WO5114, doi: 10.1029/2003WR002864 apud SØRENSEN, R. ZINKO, U. SEIBERT, J. (2006). *On the calculation of the topographic wetness index: evaluation of different methods based on field observations*. Hydrology and Earth System Sciences, v. 10, p. 101-112, 2006.

HOLMGREN, P. (1994). *Multiple Flow Direction Algorithms for Runoff Modelling in Grid-Based Elevation Models: An Empiric Evaluation*. Hydrological Processes, v. 8, p. 327-34.

HUANG, B.; JIANG, B. (2002) *AVTOP: a full integration of TOPMODEL into GIS*. Environmental Modelling & Software 17; 261-268.

IORGULESCU, I.; JORDAN, J. P. (1994) *Validation of TOPMODEL on a Small Swiss Catchment*. Journal of Hydrology, v. 159. p. 255-273.

KIRKBY, M. J. (1975). *Hydrograph Modelling Strategies*. In: R. PEEL, M. CHISHOLM, P. HAGGET (Eds). *Process in Physical and Human Geography*. Heinemann, 69-90 apud BEVEN, K. J. LAMB, P. QUINN, P. ROMANOWICZ, R. FREER J. (1995) *Chapter 18: TOPMODEL*.

In: SINGH, V. P. (Editor) . *Computer Models of Watershed Hydrology*. Louisiana: Water Resources Publications.

KIRKBY, M. J. (1997). *TOPMODEL: A Personal View*. *Hydrological Processes*, v. 11, n. 9, p. 1087-1097.

MACHADO, M. L. (2000). *Modelagem Hidrológica de Fluxo na Bacia Representativa de Juatuba*. Dissertação de Mestrado na Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2000.

MAIA, A. L. (2001). *Comparação de Modelos Geradores de Função de Produção com Base no Método DPFT: um Estudo de Caso para a Bacia Representativa de Juatuba*. Dissertação de Mestrado na Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2001.

MENDES, C. A. B.; CIRILO, J. A. (2001). *Geoprocessamento em Recursos Hídricos: Princípios, Integração e Aplicação*. ABRH – Associação Brasileira de recursos Hídricos, Porto Alegre, 2001.

MINE, M. R. M.; CLARKE, R. T. (1996). *O uso do TOPMODEL em condições brasileiras: resultado preliminar*. RBRH, vol. 1, n. 2. pp. 89-106.

MOORE, I.D.; GRAYSON, R. B.; LADSON, A. R. (1991). *Digital Terrain Modelling: A Review of Hydrological, Geomorphological an Biological Applications*. *Hydrological Processes*, 5(1): 3-30.

MOORE, I.D.; MACKAY, S. M.; WALLBRINK, P. J.; BURCH, G. J.; O'LOUGHLIN, E. M. (1986). *Hydrologic Characteristics and Modelling of a Small Forested Catchment in Southeastern New South Wales*. *Journal of Hydrology*, 83:307-335.

MOORE, I.D.; NORTON, T. W.; WILLIAMS, J. E. (1993). *Modelling Environmental Heterogeneity in Forest Landscapes*. *Journal of Hydrology*, 150:717-747.

MORAES, J. M.; SCHULER, A. E.; GUANDIQUE, M. E. G.; MILDE, L. C.; GROppo, J. D.; MARTINELLI, L. A.; VICTORIA, R. L. (2003). *Propriedades físicas dos solos na parametrização de um modelo hidrológico*. RBRH– Revista Brasileira de Recursos Hídricos, vol. 8, n. 1, pp. 61-70.

MOSLEY, M. P. (1981) *Delimitation of New Zealand Hydrologic Regions*. *Journal of Hydrology*, 49: 173-192.

NATHAN, R. J.; MCMAHON, T. A. (1990). *Identification of Homogeneous Regions for the Purposes of Regionalisation*. *Journal of Hydrology*, 121: 217-238.

O'CALLAGHAN, J. F.; MARK, D. M. (1984). *The Extraction of Drainage Networks from Digital Elevation Data*. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 28: 328-344 apud

TARBOTON, D. G. (1997) *A New Method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models*. Water Resources Research 33 (2); 309-319.

PONCE, V. M. (1989). *Engineering Hydrology: Principles and Practice*. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, 1989. 640p.

QUINN, P.F.; BEVEN, K. J. (1993). *Spatial and Temporal Predictions of Soil Moisture Dynamics, Runoff, Variable Source Areas and Evapotranspiration for Plynlimon*. Hydrological Processes, v. 7, 425-448.

QUINN, P.F.; BEVEN, K.J.; CHEVALIER, P.; PLANCHON, O. (1991). *The Prediction of Hillslope Flowpaths for Distributed Modelling Using Digital Terrain Models*. Hydrological Processes, v. 5, p. 59-80.

QUINN, P.F.; BEVEN, K. J.; LAMB R. (1995). *The $\ln(a/\tan b)$ Index: How to Calculate It and How to Use It Within the TOPMODEL Framework*. Hydrological Processes, v. 9: 161-182.

RANZINI, M.; RIGHETTO, A. M.; GUANDIQUE, M. E. G.; MORAES, J. M.; ARCOVA, F. C. S.; CICCIO, V. (2004). *Modelagem hidrológica de uma microbacia florestada da Serra do Mar, SP*. RBRH, vol. 9, n.4, pp. 33-44.

RENNÓ, C. D.; SOARES, J. V. (2003) *Uso do Índice Topográfico como Estimador da Profundidade do Lençol Freático*. Anais XI SBSR, Belo Horizonte, Brasil, 05 - 10 abril 2003, INPE, p. 2579 - 2588.

ROBSON, A.; BEVEN, K.; NEAL, C. (1992). *Towards Identifying Sources of Subsurface Flow: a Comparison of Components Identified by a Physical Based Runoff Model and those Determined by Chemical Mixing Techniques*. Hydrological Processes, 6: 199-214.

ROSA, E. U. (2002). Rio de Janeiro: PEAMB/UERJ. *Desenvolvimento de Procedimentos Computacionais para Integração de Sistemas de Informação Geográfica com Modelo Hidrológico Chuva-vazão em Bacias Urbanas*. Dissertação de Mestrado em Engenharia da Computação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Computação – Área de Concentração Geomática da Universidade Estadual do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2002.

SANTOS, I. (2001) *Modelagem Geobiohidrológica como Ferramenta no Planejamento Ambiental: Estudo da Bacia Hidrográfica do Rio Pequeno*. São José dos Pinhais. 2001. Dissertação de Mestrado em Recursos Hídricos na Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2001.

SANTOS, R. M. (2006). *A Cobrança pelo Uso dos Recursos Hídricos na Agricultura Irrigada: O Caso da Bacia do Rio São Domingos – RJ*. Rio de Janeiro: PEAMB/UERJ. Dissertação de Mestrado em Engenharia Ambiental do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Estadual do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2006.

SCHULER, A. E.; MORAES, J. M.; MILDE, L. C.; GROppo, J. D.; MARTINELLI, L. A.; VICTORIA, R. L.; CALIJURI, M. L. (2000). *Análise da representatividade física dos parâmetros do TOPMODEL em uma bacia de meso escala localizada nas cabeceiras do rio Corumbataí, São Paulo*, RBRH, vol. 5, n. 2, pp. 5-26.

SEMADS – Secretaria de Estado de Meio Ambiente e Desenvolvimento Sustentável (2001). *Bacias Hidrográficas e Rios Fluminenses – Síntese Informativa por Macrorregião Ambiental*. Projeto PLANÁGUA SEMADS / GTZ de Cooperação Técnica Brasil – Alemanha. Rio de Janeiro. 2001.

SILVA JÚNIOR, O. B. et al. (2003). *Extrapolação Espacial na Regionalização da Vazão*. RBRH, vol.8, n. 1, pp. 21-37.

SILVEIRA, A. L. (2005). *Desempenho de Fórmulas de Tempo de Concentração em Bacias Urbanas e Rurais*. RBRH, vol. 10, n. 1, pp. 5-24.

SILVEIRA, G. L.; SILVEIRA, A. L. (2003). *Vazões Mínimas*. In: PAIVA, J. B. D. & PAIVA, E. M. C. D. (Organizadores). *Hidrologia Aplicada à Gestão de Pequenas Bacias Hidrográficas*. Porto Alegre: ABRH, 2003.

SILVEIRA, G. L.; TUCCI, C. E. M. (1998). *Monitoramento em pequenas bacias para a estimativa de disponibilidade hídrica*. RBRH, vol.3, n. 3, pp. 97-110.

SILVEIRA G. L. et al. (1998). *Quantificação de vazão em pequenas bacias sem dados*. RBRH, vol. 3, n. 3, pp. 111-131.

SINGH, V. P. (1995). *Computer Models of Watershed Hydrology*. Louisiana: Water Resources Publications, 1995.

SIVALAPAN, M.; WOOD, E. F.; BEVEN, K. J. (1990). *On Hydrologic Similarity. 3. A Dimensionless Flood Frequency Model Using a Generalized Geomorphologic Unit Hydrograph na Partial Área Runoff Generation*. Water Resources Research, v. 26, p. 43-58, 1990.

SOARES, P. V.; PEREIRA, S. Y.; SIMÕES, S. J. C.; BERNARDES, G. P. (2006) *Aplicação do Conceito de Geoindicadores na Avaliação da Disponibilidade Hídrica em Bacias Hidrográficas – Uma Abordagem Introdutória*. RBRH – Revista Brasileira de Recursos Hídricos, vol. 11, n. 1. Jan/Mar 2006, 111-117.

SØRENSEN, R.; ZINKO, U.; SEIBERT, J. (2006). *On the calculation of the topographic wetness index: evaluation of different methods based on field observations*. Hydrology and Earth System Sciences, v. 10, p. 101-112, 2006.

SUI, D. Z.; MAGGIO, R. C. (1999) *Integrating GIS with Hydrological Modeling: Practices, Problems, and Prospects*. Computers, Environment and Urban Systems 23; 33-51.

TARBOTON, D. G. (1997) *A New Method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models*. Water Resources Research 33 (2); 309-319.

TARBOTON, D.G. (2005) *Terrain Analysis Using Digital Elevation Models (TauDEM)*. Utah State University, USA.

TARBOTON, D. G.; AMES, D. P. (2001) *Advances in the mapping of flow networks from digital elevation data*. World Water and Environmental Resources Congress, May 20-24, 2001, Orlando, Flórida.

TEIXEIRA, A. L. A.; CHRISTOFOLETTI, A. (1997). *Sistemas de Informação Geográfica (Dicionário Ilustrado)*. Editora Hucitec, São Paulo.

TUCCI, C. E. M. (1998). *Modelos Hidrológicos*. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS. Associação Brasileira de Recursos Hídricos.

TUCCI, C. E. M. (2002). *Regionalização de Vazões*. Porto Alegre: Editora da Universidade/UFRGS. Agência Nacional de Águas e Agência Nacional de Energia Elétrica.

VARELLA, R. F.; CAMPANA, N. A. (2000). *Simulação matemática do processo de transformação de chuva em vazão: estudo do modelo TOPMODEL*, RBRH, vol. 5, n. 4, pp. 121-142.

VILLA NOVA, N. A.; REICHERDT, K. (1989). *Evaporação e Evapotranspiração*. In Engenharia Hidrológica, Volume 2 da Coleção ABRH de Recursos Hídricos. Rio de Janeiro, 1989.

VORST, P. C.; BELL, F. C. (1981). *Geomorphic Parameters of Representative Basins and their Hydrologic Significance*. Australian Water Resources Council Technical Paper, 58:1-131 apud SILVA JÚNIOR, O. B. et al. (2003). *Extrapolação Espacial na Regionalização da Vazão*. RBRH, vol.8, n. 1, pp. 21-37.

WENDLING, J. (1992). *Modélisation Pluie-débit: Comparaison d'Approches Conceptuelles/Physico-déterministes, Globales/Semi-distribuées*. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, France apud BEVEN, K. J. LAMB, P. QUINN, P. ROMANOWICZ, R. FREER J. (1995) *Chapter 18: TOPMODEL*. In: SINGH, V. P. (Editor) . *Computer Models of Watershed Hydrology*. Louisiana: Water Resources Publications.

WHITE, J. D.; RUNNING, S. W. (1994). *Testing Scale-Dependent Assumptions in Regional Ecosystem Simulations*. Journal of Vegetation Science, 5:587-702.

WMO – World Meteorological Organization (1994). *Guide to Hydrological Practices*. WMO – n. 168. 1994. 734 p. Geneva.

WOLOCK, D. M. (1993) *Simulating the Variable-source-area Concept of Streamflow Generation with the Watershed Model TOPMODEL*. U.S. Geological Survey. Water-Resources

Investigations Report 93-4124 apud BEVEN, K. J. LAMB, P. QUINN, P. ROMANOWICZ, R. FREER J. (1995) *Chapter 18: TOPMODEL*. In: SINGH, V. P. (Editor) . *Computer Models of Watershed Hydrology*. Louisiana: Water Resouces Publications.

XAVIER, L. N. R. (2002). *Análise da Incerteza Causada pela Representação da Precipitação no Modelo TOPMODEL*. Rio de Janeiro: COPPE /UFRJ. 124 p. Tese de Mestrado em Engenharia Civil do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. 2002.

ZAKIA, M. J. B. (1998). *Identificação e Caracterização da Zona Ripária em uma Microbacia Experimental: Implicações no Manejo de Bacias Hidrográficas*. Tese (Doutorado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 118p. São Carlos, 1998.

ZINKO, U.; SEIBERT, J.; DYNESIUS, M.; NILSSON, C. (2005). *Plant Species Numbers Predicted by a Topography Based Groundwater-flow Index*. *Ecosystems*, v. 8, p. 430-441, 2005.

ZRINJI, Z.; BURN, D. H. (1994). *Flood Frequency Analysis for Ungauged Sites using a Region of Influence Approach*. *Journal of Hydrology*, 153: 1-21.