



**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA URBANA**

*Universidade Federal da Paraíba  
Centro de Tecnologia*

**- MESTRADO -**

**PREVISÃO HIDROSEDIMENTOLÓGICA NUMA BACIA  
PERIURBANA ATRAVÉS DO ACOPLAMENTO  
DE MODELOS CLIMÁTICOS E HIDROLÓGICOS**

*por*

*Richard Marques da Silva*

*Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal da Paraíba  
para obtenção do grau de Mestre*

**João Pessoa - Paraíba**

**Março - 2005**



**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA URBANA**

*Universidade Federal da Paraíba  
Centro de Tecnologia*

**- MESTRADO -**

**PREVISÃO HIDROSEDIMENTOLÓGICA NUMA BACIA  
PERIURBANA ATRAVÉS DO ACOPLAMENTO  
DE MODELOS CLIMÁTICOS E HIDROLÓGICOS**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana da Universidade Federal da Paraíba, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre

**Richarde Marques da Silva**

**ORIENTADOR: Prof. Dr. Celso Augusto Guimarães Santos**

**João Pessoa - Paraíba**

**Março - 2005**

S586e

Silva, Richarde Marques da.

Previsão hidrossedimentológica numa bacia periurbana através do acoplamento de modelos climáticos e hidrológicos/Richarde Marques da Silva. João Pessoa: 2005.

171p.

Orientador: Celso Augusto Guimarães Santos.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana).

UFPB/CT.

Inclui bibliografia.

1. Previsão hidrossedimentológica. 2. Erosão. 3. Sistemas de Informações Geográficas. 4. Bacia do Rio Pirapama.

UFPB/BC

CDU 628.54(043)

**RICHARDE MARQUES DA SILVA**

**PREVISÃO HIDROSEDIMENTOLÓGICA NUMA BACIA  
PERIURBANA ATRAVÉS DO ACOPLAMENTO  
DE MODELOS CLIMÁTICOS E HIDROLÓGICOS**

**APROVADA EM:** \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_ / \_\_\_\_\_

**BANCA EXAMINADORA:**

---

Prof. Dr. Celso Augusto Guimarães Santos - UFPB  
(Orientador)

---

Prof. Dr. Eduardo Rodrigues Viana de Lima - UFPB  
(Examinador Interno)

---

Prof. Dr. Carlos de Oliveira Galvão - UFCG  
(Examinador Externo)

In Memoriam,

A Vó Maria e Vô Luiz, pessoas que nasceram para carregar bandeiras, cuidar dos filhos e netos, e acima de tudo transmitir fé e carinho para todos em volta. E apesar de suas partidas nunca esquecerei os dois, pois sempre passaram coragem e uma lição de vida: nunca desistir.

## AGRADECIMENTOS

Um trabalho acadêmico é feito por duas mãos, mas também por inúmeras contribuições que recebemos no curso da vida: família, amigos, mestres, comunidades, teóricos, técnicos, administradores, todos que de uma forma ou de outra, passaram por nossa vida ao longo dos anos em estudo e contribuíram para o resultado final desta pesquisa.

- Agradeço a Deus, ao absoluto que rege nossas vidas e que me permitiu chegar à conclusão desta Dissertação.
- Aos meus pais José e Francisca, fonte de minha existência.
- Ao professor Celso Augusto Guimarães Santos pela orientação, paciência e dedicação passadas para mim durante a construção deste trabalho.
- À professora Emilia de Rodat Fernandes Moreira por sua amizade, companheirismo e pelos seus ensinamentos que carrego comigo hoje e para sempre.
- Ao meu colega Iltonio Alves Nitão pelo coleguismo e pela ajuda inicial na calibração do modelo Kineros2.
- Aos sub-coordenadores do Projeto PRECLIHNE, os professores da UFCG Carlos de Oliveira Galvão e Manoel Gomes Filho, a Paulo Nobre do CPTEC/INPE, a Francis Lacerda da SECTMA-PE pela orientação e apoio durante o transcorrer deste trabalho.
- Agradeço a Maria Aparecida Fernandes Ferreira e a Simone Rosa da Silva do LAMEPE pelos mapas da bacia, pelos dados observados de chuva e de vazão da bacia.
- Aos colegas e participantes do Projeto PRECLIHNE, Klecia Forte de Oliveira, Gustavo de Souza, Isabelle Costa, Ana Cláudia Medeiros, Lívia Marinho e Rita Micheline Ricarte, pela camaradagem e pela ajuda na conversão dos dados.
- À Universidade Federal da Paraíba, a CAPES, ao Projeto PRECLIHNE, ao CT-Hidro e a FINEP, que ajudaram na realização desta etapa da minha vida.
- Ao Lrehena (Laboratório de Recursos Hídricos e Engenharia Ambiental) do Centro de Tecnologia da UFPB, pela disponibilização de equipamentos e material para a realização desta pesquisa.
- A Giovanna, minha noiva que entendeu os momentos de solidão quando estive ausente e pelo apoio incondicional demonstrado ao longo desses dois anos, e a Zélia Vilar, minha querida sogra, que me apoiou desde o primeiro dia para a concretização desta etapa da minha vida.
- Aos professores Pedro Costa Guedes Vianna e Eduardo Rodrigues Viana de Lima, coordenadores do Lepan (Laboratório de Pesquisa, Ensino e Análise Ambiental) do Departamento de Geociências da UFPB, pelo apoio na realização desta pesquisa.

-A Leonardo Pereira e Silva, pelas dicas na construção dos mapas e na assistência em informática.

- Aos colegas do Mestrado, Jussara Severo, Antonio Willamys, Alba Valéria Pinheiro, Gustavo Lira, Valkisfran Brtio, Ubiratan Pimentel, Enildo Tales, Jameson da Silva e Francisco Sales, pelo incentivo, apoio e entusiasmo durante a passagem pelo Programa.

## RESUMO

O objetivo do presente estudo é desenvolver a integração de um sistema de previsão hidrometeorológica para uso em sistemas de informações para ser usado por comitês de bacias hidrográficas. Para a modelagem da previsão hidrossedimentológica na bacia do rio Pirapama, localizada na costa litorânea do Estado de Pernambuco no Nordeste do Brasil, foi realizado o acoplamento de dados de previsão de precipitação gerados pelo aninhamento de um modelo de circulação global atmosférica e um modelo de circulação regional atmosférica em modelos hidrológicos. Foram geradas dez séries de previsão climática de 14 anos, de 1987 a 2000 para os seis primeiros meses de cada ano. Essa série de dados foi inserida em dois modelos hidrológicos. O primeiro, o Açumod, é um modelo de chuva-vazão que usa parâmetros distribuídos, e tem como entrada a precipitação e a evapotranspiração, representando o balanço hídrico através de um sistema de reservatórios. O segundo, o modelo Kineros2, é do tipo distribuído de base física e orientado a evento, que simula a vazão e a produção de sedimentos. Os resultados mostraram um ajuste satisfatório entre as vazões observadas e as vazões calculadas a partir dos dados de previsão climática obtidos dos modelos de circulação atmosférica. Este trabalho é uma primeira tentativa de previsão hidrossedimentológica para a bacia do rio Pirapama, e mesmo assim, os resultados obtidos mostraram que o sistema pode ser considerado uma promissora ferramenta para previsão hidrossedimentológica em bacias da região Nordeste do Brasil.

**PALAVRAS-CHAVES:** previsão hidrossedimentológica; erosão; SIG; bacia Pirapama.

## ABSTRACT

The objective of the present study is to develop an integrated system of hydro-meteorological forecasting (rainfall-runoff-erosion) to be applied in information systems to be used by watershed committees. In order to model the rainfall-runoff-erosion forecasting to Pirapama river basin, which is located in the coast of Pernambuco state in northeastern Brazil, it was accomplished the coupling of forecasted rainfall data generated by a nesting between a atmospheric regional circulation model and an atmospheric global circulation model into rainfall-runoff-erosion simulation models. A climate forecast series of 14 years was generated, from 1987 to 2000 for the first six months of each year. That data series was inserted into two hydrologic models. The first one, AçuMod, is a rainfall-runoff model that uses distributed parameters, and has as input the precipitation and evapotranspiration data and then the water balance is carried out with a system of reservoirs. The second one, Kineros2, is an event-oriented, physically-based model, which simulates the surface runoff and the sediment yield. The results showed a satisfactory agreement between the computed and observed runoff data using forecasted rainfall data. This study is a first attempt to forecast rainfall-runoff-erosion to Pirapama river basin, and even so, the obtained results showed that this system can be considered a promising tool to runoff-erosion forecasting in watersheds of northeastern Brazil.

**Keywords:** runoff-erosion forecasting; erosion; GIS; Pirapama river basin.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Principais problemas decorrentes da urbanização que incidem sobre a quantidade e a qualidade das águas (Adaptado de TUNDISI, 2003).....	22
Figura 1.2 - Localização da bacia do rio Pirapama.....	23
Figura 2.1 - Hidrografia, localização dos principais rios e reservatórios da bacia do rio Pirapama.....	27
Figura 2.2 - Localização dos postos pluviométricos e fluviométricos existentes na bacia....	31
Figura 2.3 - Hietograma e hidrograma observados para o posto Pirapama entre 1987 e 2001.....	32
Figura 3.1 - Figura 3.1 - Espacialização do regime de distribuição d'água na RMR em fevereiro de 1997 e localização da bacia do rio Pirapama (adaptado de NASCIMENTO, 2003).....	39
Figura 3.2 - Modelagem da bacia hidrográfica do rio Pirapama (adaptado de RIOS, 2000).	40
Figura 3.3 - O uso do SIG na modelagem hidrológica.....	56
Figura 4.1 - Geologia da bacia do rio Pirapama.....	61
Figura 4.2 - Tipos de solos da bacia do rio Pirapama.....	62
Figura 4.3 - Exemplo de um arquivo de entrada de chuva do modelo Kineros2.....	69
Figura 4.4 - Exemplo de um arquivo de entrada dos parâmetros do modelo Kineros2.....	70
Figura 4.5 - Áreas de influência para cada posto pluviométrico.....	74
Figura 4.6 - Modelo de discretização das células.....	75
Figura 4.7 - Direção da drenagem nas células.....	75
Figura 4.8 - Esquema das zonas hidrológicas homogêneas.....	75
Figura 4.9 - Mapa das zonas hidrologicamente homogêneas da bacia Pirapama.....	76
Figura 4.10 - Discretização e elementos da estrutura hidráulica.....	77
Figura 4.11 - Conjunto dos reservatórios que simulam o ciclo hidrológico no Açumod.....	78
Figura 4.12 - Espaçamento da malha dos modelos global e regional e localização da bacia hidrográfica do rio Pirapama (adaptado de GALVÃO et al., 2005).....	80

Figura 5.1 - Hietograma médio observado e hidrogramas observado e calculado para o posto Pirapama durante a calibração do modelo.....	85
Figura 5.2 - Hietograma médio observado e hidrogramas observado e calculado para o posto Pirapama durante a validação do modelo.....	87
Figura 5.3 - Altimetria da bacia do rio Pirapama.....	89
Figura 5.4 - Discretização da bacia do rio Pirapama.....	90
Figura 5.5 - Modelo Numérico do Terreno da bacia hidrográfica do rio Pirapama.....	90
Figura 5.6 - Hietograma médio observado e hidrogramas observado e calculado para o posto fluviométrico Ponte PE-35.....	95
Figura 5.7 - Hietograma médio observado e hidrogramas observado e calculado para o posto fluviométrico Destilaria Inexport.....	95
Figura 5.8 - Hietograma médio observado e hidrogramas observado e calculado para o posto fluviométrico Pirapama.....	96
Figura 5.9 - Hietograma médio observado e hidrogramas observado e calculado para o posto fluviométrico Destilaria Bom Jesus.....	96
Figura 5.10 - Hietograma observado e sedigrama calculado para o exutório da bacia do rio Pirapama para o ano de 2000.....	99
Figura 5.11 - Sedigrama calculado das cinco classes de sedimentos para a barragem Pirapama para 2000.....	100
Figura 5.12 - Espacialização da vazão para cada sub-bacia da bacia Pirapama em 2000.....	102
Figura 5.13 - Espacialização da produção de sedimentos para a bacia Pirapama em 2000..	103
Figura 5.14 - Hietograma anual observado e produção total anual de sedimentos calculado chegando na barragem Pirapama.....	104
Figura 5.15 - Hietograma médio diário observado e sedigrama diário calculado chegando na barragem Pirapama.....	105
Figura 5.16 - Aporte de sedimentos calculado para o reservatório Pirapama.....	105
Figura 6.1 - Hietograma médio calculado a partir da previsão do RSM e hidrogramas observado e calculado pelo Açumod para o período de 1987 a 2000.....	111
Figura 6.2 - Hietograma médio calculado a partir da previsão do RSM e os hidrogramas observado e calculado pelo Kineros2 para o posto Pirapama a partir da média da precipitação prevista pelo RSM para 1987.....	113

Figura 6.3 -	Hietograma médio calculado a partir da previsão do RSM e os hidrogramas observado e calculado pelo Kineros2 para o posto Pirapama a partir da média da precipitação prevista pelo RSM para 1988.....	113
Figura 6.4 -	Hietograma médio calculado a partir da previsão do RSM e os hidrogramas observado e calculado pelo Kineros2 para o posto Pirapama a partir da média da precipitação prevista pelo RSM para 1989.....	114
Figura 6.5 -	Hietograma médio calculado a partir da previsão do RSM e os hidrogramas observado e calculado pelo Kineros2 para o posto Pirapama a partir da média da precipitação prevista pelo RSM para 1990.....	115
Figura 6.6 -	Hietograma médio calculado a partir da previsão do RSM e os hidrogramas observado e calculado pelo Kineros2 para o posto Pirapama a partir da média da precipitação prevista pelo RSM para 1991.....	115
Figura 6.7 -	Hietograma médio calculado a partir da previsão do RSM e os hidrogramas observado e calculado pelo Kineros2 para o posto Pirapama a partir da média da precipitação prevista pelo RSM para 1992.....	116
Figura 6.8 -	Hietograma médio calculado a partir da previsão do RSM e os hidrogramas observado e calculado pelo Kineros2 para o posto Pirapama a partir da média da precipitação prevista pelo RSM para 1993.....	117
Figura 6.9 -	Hietograma médio calculado a partir da previsão do RSM e os hidrogramas observado e calculado pelo Kineros2 para o posto Pirapama a partir da média da precipitação prevista pelo RSM para 1994.....	117
Figura 6.10 -	Hietograma médio calculado a partir da previsão do RSM e os hidrogramas observado e calculado pelo Kineros2 para o posto Pirapama a partir da média da precipitação prevista pelo RSM para 1995.....	118
Figura 6.11 -	Hietograma médio calculado a partir da previsão do RSM e os hidrogramas observado e calculado pelo Kineros2 para o posto Pirapama a partir da média da precipitação prevista pelo RSM para 1996.....	118
Figura 6.12 -	Hietograma médio calculado a partir da previsão do RSM e os hidrogramas observado e calculado pelo Kineros2 para o posto Pirapama a partir da média da precipitação prevista pelo RSM para 1997.....	119
Figura 6.13 -	Hietograma médio calculado a partir da previsão do RSM e os hidrogramas observado e calculado pelo Kineros2 para o posto Pirapama a partir da média da precipitação prevista pelo RSM para 1998.....	119
Figura 6.14 -	Hietograma médio calculado a partir da previsão do RSM e os hidrogramas observado e calculado pelo Kineros2 para o posto Pirapama a partir da média da precipitação prevista pelo RSM para 1999.....	120

Figura 6.15 - Hietograma médio calculado a partir da previsão do RSM e os hidrogramas observado e calculado pelo Kineros2 para o posto Pirapama a partir da média da precipitação prevista pelo RSM para 2000.....	120
Figura 6.16 - Sedimentogramas anuais calculados chegando na barragem Pirapama a partir da precipitação observada e da média da precipitação do RSM.....	122
Figura 6.17 - Aporte de sedimentos anuais calculados para a barragem Pirapama a partir da precipitação observada e da precipitação média do RSM.....	122
Figura 6.18 - Espacialização da produção sedimentos média calculada para cada elemento da bacia do reservatório Pirapama a partir da precipitação média do RSM.....	123

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Descrição dos postos pluviométricos utilizados.....	30
Tabela 2.2 - Descrição dos postos fluviométricos utilizados.....	31
Tabela 3.1 - Projeção populacional para os municípios da RMR.....	35
Tabela 3.2 - Período de racionamento de água na RMR em 1997.....	39
Tabela 3.3 - Pontos de captação de água da RMR.....	42
Tabela 3.4 - Volume de água acumulada nos reservatórios da RMR no dia 05/10/95.....	43
Tabela 3.5 - Volume de água acumulada nos reservatórios da RMR no dia 29/02/96.....	43
Tabela 3.6 - Volume de água acumulada nos reservatórios da RMR no dia 30/06/96.....	43
Tabela 3.7 - Volume de água acumulada nos reservatórios da RMR no dia 31/07/98.....	43
Tabela 3.8 - Volume de água acumulada nos reservatórios da RMR no dia 19/02/99.....	44
Tabela 3.9 - Volume de água acumulada nos reservatórios da RMR no dia 05/09/99.....	44
Tabela 3.10 - Volume de água acumulada nos reservatórios da RMR no dia 04/11/2001.....	44
Tabela 3.11 - Volumes totais do assoreamento do reservatório Funil-RJ (VILHENA et al., 2003).....	55
Tabela 4.1 - Descrição dos postos pluviométricos utilizados pelo modelo Açumod.....	73
Tabela 4.2 - Descrição dos parâmetros do modelo Açumod.....	78
Tabela 5.1 - Parâmetros calibrados do modelo Açumod.....	85
Tabela 5.2 - Indicadores da qualidade da calibração do modelo Açumod.....	86
Tabela 5.3 - Indicadores de qualidade da validação do modelo Açumod.....	87
Tabela 5.4 - Precipitação média calculada pelo método de Thiessen a partir dos dados observados dos postos Pombos, Engenho Cachoeirinha e Pirapama.....	88
Tabela 5.5 - Parâmetros para a camada superior de solo usados no processo de calibração.....	92
Tabela 5.6 - Parâmetros para as duas camadas de solo usados no processo de calibração.....	92
Tabela 5.7 - Guia de estimativa para propriedades hidráulicas do solo proposto por Rawls et al. (1991).....	93

Tabela 5.8 - Volumes das vazões calculadas para cada sub-bacia em 2000.....	97
Tabela 5.9 - Qualidade da calibração do modelo Kineros2.....	97
Tabela 5.10 - Produção de sedimentos de acordo com o tamanho das partículas para 2000.	100
Tabela 5.11 - Assoreamento Potencial da barragem Pirapama.....	100
Tabela 6.1 - Variáveis da superfície do modelo RSM.....	108
Tabela 6.2 - Listagem dos parâmetros do modelo RSM.....	109
Tabela 6.3 - Postos pluviométricos selecionados na bacia do rio Pirapama.....	110
Tabela 6.4 - Indicadores de qualidade da validação do modelo Açumod.....	112

## LISTA DE APÊNDICES

Tabela A.1 - Vazões observadas e calculadas pelo modelo Açumod durante a calibração para o posto fluviométrico Pirapama entre 1987 e 1994.....	137
Tabela A.2 - Vazões observadas e calculadas pelo modelo Açumod durante a validação para o posto fluviométrico Pirapama entre 1995 e 2001.....	139
Quadro B.1 - Características geométricas e seqüência de cálculo dos elementos da bacia do rio Pirapama pelo modelo Kineros2.....	142
Quadro C.1 - Lista dos valores dos parâmetros calibrados pelo modelo Kineros2 dos elementos discretizados da bacia do rio Pirapama.....	155
Figura D.1 - Hidrograma médio calculado com a precipitação prevista pelo RSM, e sedigramas calculados com a precipitação observada e com a precipitação média prevista pelo RSM para 1987.....	165
Figura D.2 - Hidrograma médio calculado com a precipitação prevista pelo RSM, e sedigramas calculados com a precipitação observada e com a precipitação média prevista pelo RSM para 1988.....	165
Figura D.3 - Hidrograma médio calculado com a precipitação prevista pelo RSM, e sedigramas calculados com a precipitação observada e com a precipitação média prevista pelo RSM para 1989.....	166
Figura D.4 - Hidrograma médio calculado com a precipitação prevista pelo RSM, e sedigramas calculados com a precipitação observada e com a precipitação média prevista pelo RSM para 1990.....	166
Figura D.5 - Hidrograma médio calculado com a precipitação prevista pelo RSM, e sedigramas calculados com a precipitação observada e com a precipitação média prevista pelo RSM para 1991.....	167
Figura D.6 - Hidrograma médio calculado com a precipitação prevista pelo RSM, e sedigramas calculados com a precipitação observada e com a precipitação média prevista pelo RSM para 1992.....	167
Figura D.7 - Hidrograma médio calculado com a precipitação prevista pelo RSM, e sedigramas calculados com a precipitação observada e com a precipitação média prevista pelo RSM para 1993.....	168
Figura D.8 - Hidrograma médio calculado com a precipitação prevista pelo RSM, e sedigramas calculados com a precipitação observada e com a precipitação média prevista pelo RSM para 1994.....	168
Figura D.9 - Hidrograma médio calculado com a precipitação prevista pelo RSM, e sedigramas calculados com a precipitação observada e com a precipitação média prevista pelo RSM para 1995.....	169

Figura D.10 - Hidrograma médio calculado com a precipitação prevista pelo RSM, e sedigramas calculados com a precipitação observada e com a precipitação média prevista pelo RSM para 1996.....	169
Figura D.11 - Hidrograma médio calculado com a precipitação prevista pelo RSM, e sedigramas calculados com a precipitação observada e com a precipitação média prevista pelo RSM para 1997.....	170
Figura D.12 - Hidrograma médio calculado com a precipitação prevista pelo RSM, e sedigramas calculados com a precipitação observada e com a precipitação média prevista pelo RSM para 1998.....	170
Figura D.13 - Hidrograma médio calculado com a precipitação prevista pelo RSM, e sedigramas calculados com a precipitação observada e com a precipitação média prevista pelo RSM para 1999.....	171
Figura D.14 - Hidrograma médio calculado com a precipitação prevista pelo RSM, e sedigramas calculados com a precipitação observada e com a precipitação média prevista pelo RSM para 2000.....	171

## SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS

RESUMO

ABSTRACT

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE APÊNDICES

1 INTRODUÇÃO.....	21
1.1 Objetivo Geral e Específicos.....	24
1.2 Descrição dos Capítulos.....	24
2 A ÁREA DE ESTUDO.....	26
2.1 Localização.....	26
2.2 O Comitê de Bacia Hidrográfica: Breve Histórico.....	28
2.3 Importância da Bacia para a Região Metropolitana do Recife.....	29
2.4 Informações Pluviométricas Disponíveis.....	30
2.5 Informações Fluviométricas Disponíveis.....	30
2.6 Características Físico-Climatológicas.....	32
3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	33
3.1 Projeção, Crescimento Populacional e Previsão de Abastecimento de Água.....	34
3.2 Sistema de Abastecimento de Água da Região Metropolitana do Recife.....	36
3.2.1 Situação atual e vulnerabilidade do sistema de abastecimento de água da RMR.....	37
3.2.2 Funcionamento dos principais sistemas de abastecimento de água da RMR.....	41
3.3 Modelagem Hidrológica de Bacias Urbanas.....	45
3.4 Modelos Hidrológicos.....	46

3.4.1	Classificação dos modelos hidrológicos.....	47
3.5	Previsão Climática, <i>Downscaling</i> e Acoplamento de Modelos Climáticos com Hidrológicos.....	48
3.6	Assoreamento de Reservatórios.....	51
3.7	Sistema de Informações Geográficas e Modelagem Hidrológica.....	55
3.8	Considerações Finais.....	59
4	METODOLOGIA: MATERIAIS E MÉTODOS.....	60
4.1	Modelos Utilizados na Pesquisa.....	63
4.2	Definição do Modelo Kineros2.....	64
4.2.1	O modelo de infiltração do solo.....	64
4.2.2	Escoamento superficial no plano.....	65
4.2.3	Escoamento superficial no canal.....	66
4.2.4	Erosão nos planos e canais.....	67
4.3	Dados de Entrada do Modelo Kineros2.....	69
4.3.1	Dados de entrada.....	69
4.4	Parâmetros do Modelo Kineros2.....	69
4.4.1	Parâmetros globais do modelo Kineros2.....	70
4.4.2	Parâmetros dos planos do modelo Kineros2.....	71
4.4.3	Parâmetros dos canais do modelo Kineros2.....	71
4.4.4	Estimativa dos parâmetros do modelo Kineros2.....	72
4.5	Descrição do Modelo Açumod.....	73
4.5.1	Dados de entrada do modelo Açumod.....	73
4.5.2	Discretização da bacia no modelo Açumod.....	74
4.5.3	Zonas hidrologicamente homogêneas.....	75
4.5.4	Elementos da estrutura hidráulica.....	76

4.5.5 Parâmetros do modelo Açumod.....	77
4.6 Breve Descrição do Programa Grads e do Modelo de Circulação Atmosférica Regional.....	79
<b>5 SIMULAÇÕES HIDROLÓGICAS E DO APORTE DE SEDIMENTOS NO RESERVATÓRIO PIRAPAMA.....</b>	<b>82</b>
5.1 Aplicação do Modelo Açumod na Bacia do Rio Pirapama.....	82
5.1.1 Dados de entrada.....	83
5.1.2 Resultados da calibração do modelo Açumod.....	84
5.1.3 Resultados da validação do modelo Açumod.....	86
5.2 Aplicação do Modelo Kineros2: Resultados para a Bacia Pirapama.....	88
5.2.1 Discretização espacial da bacia do rio Pirapama.....	89
5.2.2 Estimativa dos parâmetros do modelo Kineros2.....	91
5.2.3 Calibração do modelo Kineros2.....	94
5.2.4 Produção de sedimentos: resultados e discussão.....	97
5.3 Modelagem Hidrossedimentológica Acoplada a um SIG.....	101
5.4 Aporte de sedimentos no Reservatório Pirapama: resultados e discussões.....	103
<b>6 PREVISÃO HIDROSEDIMENTOLÓGICA NUMA BACIA PERIURBANA: O ESTUDO DE CASO PIRAPAMA.....</b>	<b>107</b>
6.1 Previsão Climática na Bacia do Rio Pirapama: Metodologia e Resultados.....	107
6.1.1 Dados de entrada do modelo RSM.....	107
6.2 Previsão de Vazão na Bacia do Rio Pirapama.....	110
6.2.1 Aplicação do modelo Açumod.....	111
6.2.2 Aplicação do modelo Kineros2.....	112
6.3 Previsão da Produção de Sedimentos na Bacia do Rio Pirapama.....	121
6.4 Previsão do Aporte de Sedimentos no Reservatório Pirapama.....	121
6.5 Distribuição Espacial da Previsão da Produção de Sedimentos.....	123

7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	125
7.1 Conclusões.....	125
7.2 Recomendações.....	127
REFERÊNCIAS.....	129
APÊNDICE A.....	136
APÊNDICE B.....	141
APÊNDICE C.....	154
APÊNDICE D.....	164

## 1 INTRODUÇÃO

Há algumas décadas atrás, a questão da gestão da água na sociedade moderna já despertava reações contraditórias, pois muitas pessoas, confiantes na abundância não se preocupavam com a quantidade de água disponível, entretanto outras, mais conscientes, entendiam que tal recurso é finito e que a riqueza de recursos hídricos poderia não ser suficiente no futuro, pois, estima-se que até o ano 2025 metade da população mundial estará vivendo em áreas urbanas.

Essa aglomeração da população mundial em determinados locais aumenta o uso ainda mais desenfreado dos recursos naturais, intensificando as atividades poluidoras do meio ambiente, comprometendo assim, o aproveitamento dos recursos hídricos, dentre eles um dos mais importantes para a existência do homem, a água.

Com o aumento populacional ocorrido nas últimas décadas, verificado em praticamente todo o planeta, vários conflitos têm sido gerados nas grandes regiões metropolitanas, como descritos na Figura 1.1, dos quais destacam-se: (a) degradação ambiental dos mananciais; (b) aumento do risco de contaminação das áreas de abastecimento com a poluição orgânica e química; (c) contaminação dos rios pelos esgotos domésticos, industriais e pluviais; e (d) enchentes urbanas geradas pela ocupação desordenada do espaço urbano, pela falta ou planejamento inadequado da drenagem urbana.

O elevado crescimento populacional das áreas urbanas tem acelerado a implantação de novos loteamentos, que pelo caráter emergencial ou especulativo geralmente têm sido realizados de maneira não planejada. Essa ocupação desordenada da área periurbana tem desencadeado sérios problemas erosivos. Atualmente, diversos são os estudos que enfatizam aplicações de modelagem hidrológica em bacias hidrográficas, todavia, poucos trabalhos de

previsão hidrossedimentológica têm sido realizados em bacias periurbanas, ainda mais, aqueles que envolvem o acoplamento de um modelo de previsão climática com o de simulação hidrológica.

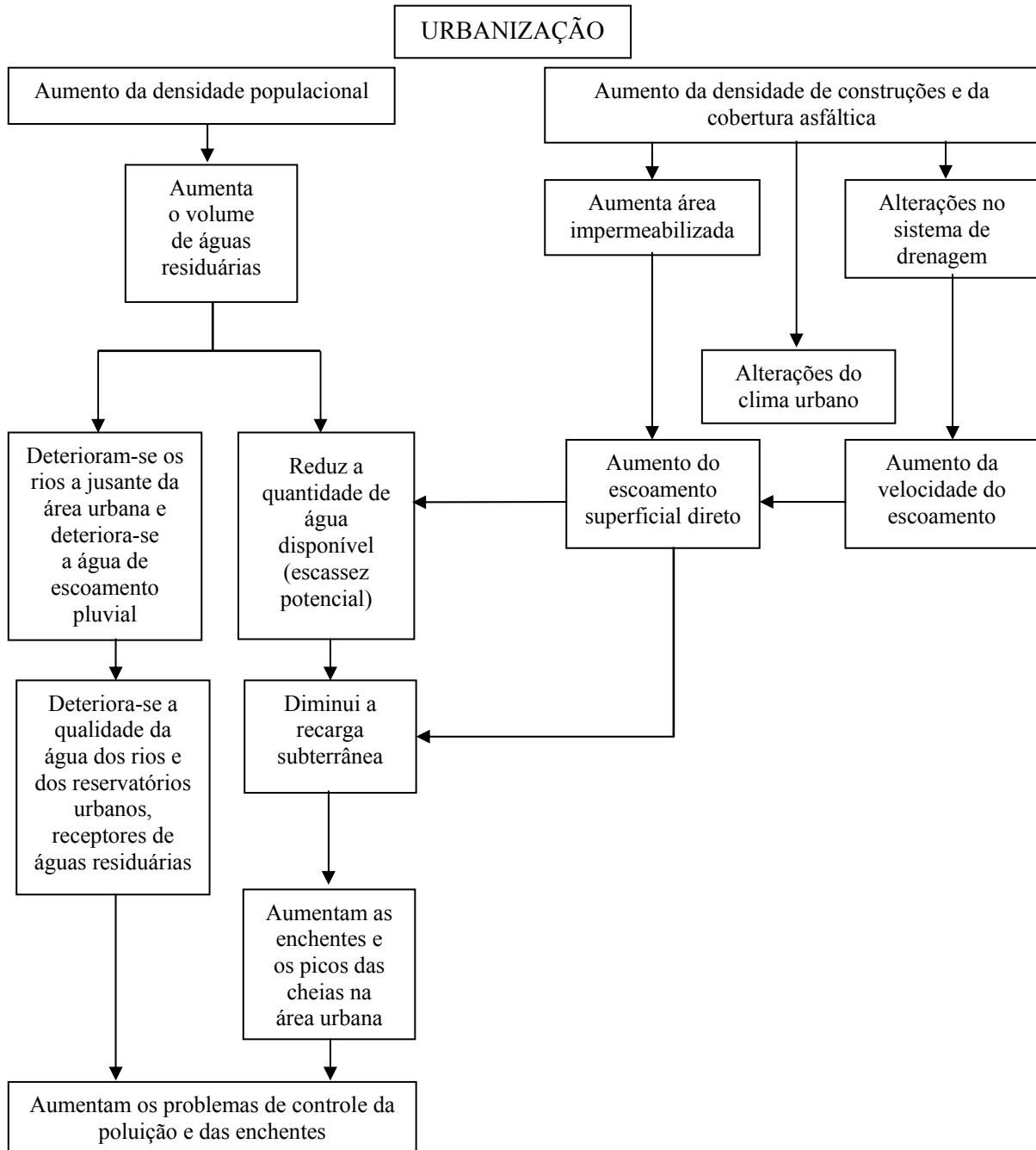


Figura 1.1 - Principais problemas decorrentes da urbanização que incidem sobre a quantidade e a qualidade das águas (adaptado de TUNDISI, 2003).

Estudos de previsão hidrossedimentológica são de grande valia para o conhecimento do gerenciamento dos recursos hídricos de bacias periurbanas, pois auxiliam nas simulações de diversos processos, tais como: (a) simulação das vazões efluentes em reservatórios para o abastecimento urbano; (b) avaliar possíveis riscos de enchentes em zonas urbanas; (c)

identificação de problemas de drenagem urbana; (d) identificação de áreas susceptíveis à erosão; e (e) previsão de assoreamento potencial de reservatórios. Pesquisas de previsão hidrossedimentológica são importantes também na avaliação da evolução da degradação do meio ambiente da bacia, através da simulação de diferentes cenários de uso e ocupação do solo, isso porque, o equilíbrio ambiental da bacia está diretamente relacionado com o grau de conservação e do tipo de ocupação da bacia.

No presente estudo é apresentado o acoplamento de um modelo de previsão climática global e um modelo de previsão climática regional com modelos de simulação de vazão e erosão numa bacia hidrográfica do litoral oriental do Nordeste do Brasil. Neste trabalho, adotou-se como área de estudo a bacia hidrográfica do rio Pirapama (Figura 1.2), uma vez que a mesma já possui instalado um comitê de bacia hidrográfica, o COBH-Pirapama – Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Pirapama, pois optou-se por uma bacia que permitisse que este sistema pudesse ser implementado e usado imediatamente por um comitê de bacia hidrográfica, atuando como uma ferramenta em estudos de previsão hidrossedimentológica. Outro fator que levou a escolha dessa área, foi o caráter da necessidade de previsão hidroclimatológica dessa bacia no contexto do abastecimento hídrico da região, pois a bacia do rio Pirapama é uma das principais fontes responsáveis pelo suprimento de água da Região Metropolitana do Recife – RMR, possuindo uma das maiores concentrações populacionais do país, com mais de três milhões de habitantes.

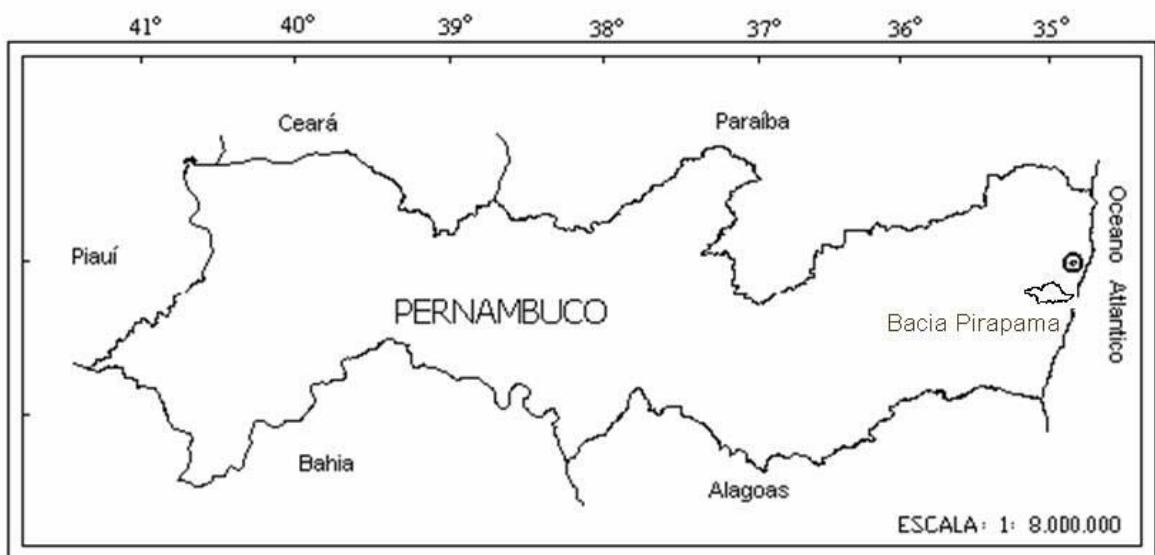


Figura 1.2 - Localização da bacia do rio Pirapama.

Como a demanda e a qualidade da água são encaradas hoje como um dos principais problemas da sociedade moderna, e consequentemente das áreas urbanas formadas pelas

grandes regiões metropolitanas brasileiras, a questão da gestão e da disponibilidade hídrica de uma bacia periurbana deve ser tratada também no âmbito da Engenharia Urbana, uma vez que a mesma se preocupa com os problemas relacionados com o gerenciamento da água no setor urbano.

## **1.1 Objetivo Geral e Específicos**

O objetivo principal do trabalho é desenvolver uma metodologia para um sistema integrado de previsão hidrossedimentológica (vazão-erosão) para uso em sistemas de informação e de outorga para gerenciamento de recursos hídricos.

Esse objetivo é guiado por uma série de objetivos específicos, entre os quais:

- (a) calibrar e validar o modelo hidrológico Açumod e o modelo hidrossedimentológico Kineros2 para a bacia do rio Pirapama;
- (b) utilizar a saída de dados do aninhamento entre o Modelo de Circulação Global Atmosférico ECHAM – *European Community - Hamburg* e o Modelo de Circulação Regional Atmosférico RSM – *Regional Spectral Model* nos modelos hidrológicos e comparar com os dados observados de chuva e vazão de postos da bacia Pirapama;
- (d) estimar o aporte de sedimentos potencial no reservatório Pirapama através da conversão vazão-erosão através dos dados de precipitação previstos pelo aninhamento dos modelos de previsão climática e observados, utilizando o modelo hidrossedimentológico Kineros2; e
- (e) realizar o acoplamento da saída do modelo Kineros2 num Sistema de Informações Geográficas.

## **1.2 Descrição dos Capítulos**

O texto está estruturado em seis capítulos, incluindo esta Introdução. No Capítulo 2 estão contidos comentários a respeito da localização da área de estudo; informações sobre a bacia, os dados pluviométricos e fluviométricos utilizados, o processo de ocupação da região,

a importância da bacia e do reservatório Pirapama para a Região Metropolitana do Recife; uma abordagem detalhada das características físicas da bacia; e o processo de avaliação dos dados, descrevendo detalhadamente os materiais e métodos empregados neste trabalho.

O Capítulo 3 apresenta a revisão da literatura onde são abordados: o crescimento e projeção populacional para a Região Metropolitana do Recife – RMR e a situação atual do abastecimento d’água da RMR. Aborda também o conceito e a importância, de forma sucinta, a respeito de modelos hidrológicos, modelos climáticos, Sistema de Informações Geográficas e modelos hidrológicos, assoreamento em reservatórios urbanos, e acoplamento de modelos climáticos e hidrológicos.

O Capítulo 4 apresenta os modelos computacionais utilizados na pesquisa, expressando de forma detalhada a base conceitual dos modelos hidrológicos, atmosférico e matemático, e suas aplicações em diversos estudos já elaborados.

O Capítulo 5 é dedicado à apresentação dos resultados da modelagem da vazão, da produção de sedimentos e o consequente assoreamento potencial do reservatório Pirapama, através de simulações com os modelos Açumod e Kineros2, bem como a implantação dos resultados das simulações num Sistema de Informações Geográficas – SIG.

O acoplamento entre os modelos climáticos e hidrológicos e as simulações de vazão, produção de sedimentos e o consequente assoreamento potencial do reservatório Pirapama são mostrados no Capítulo 6. No último capítulo estão contidas as conclusões do presente estudo, e as recomendações propostas para trabalhos futuros, como forma de incentivar a realização de futuros trabalhos de previsão hidrossedimentológica em bacias periurbanas.

## 2 A ÁREA DE ESTUDO

### 2.1 Localização

A Bacia do Rio Pirapama situa-se na porção centro-sul da Região Metropolitana do Recife – RMR e da Zona da Mata Pernambucana, entre as latitudes  $8^{\circ} 07' 29''$  e  $8^{\circ} 21' 00''$  S e as longitudes  $34^{\circ} 56' 20''$  e  $35^{\circ} 23' 13''$  W. Esta é limitada ao norte pelas bacias dos rios Jaboatão e Tapacurá, a oeste pela bacia do rio Ipojuca, ao sul pelas bacias dos rios Ipojuca e Massangana e a leste com o Oceano Atlântico. Sua nascente está localizada no município de Pombos (Agreste Pernambucano), a aproximadamente 450 m de altitude. O rio Pirapama percorre cerca de 80 km de extensão, desde suas nascentes em Pombos, até desembocar no rio Jaboatão, entre os municípios de Cabo de Santo Agostinho e Jaboatão dos Guararapes, sendo estratégico para o abastecimento da RMR (CPRH, 2000). Sua rede hidrográfica tem como principais tributários da margem esquerda os rios Gurjaú, Cajabuçu e Arariba e os riachos dos Macacos e Arandu (Figura 2.1). Na margem direita, destacam-se os riachos Santa Amélia, Utinga de Cima e Camaçari (FALCÃO NETO, 2003).

A bacia do rio Pirapama situa-se na parte sul da RMR, possui cerca de  $600 \text{ km}^2$  e abrange a área de sete municípios: Cabo de Santo Agostinho, Jaboatão dos Guararapes, Ipojuca, Moreno, Escada, e Pombos. Destaca-se, entre eles, o município do Cabo com 57% da área da bacia em seu território, inclusive sua sede municipal e o Distrito Industrial de Cabo de Santo Agostinho.

Uma grande parte da bacia é ocupada por atividades agrícolas, mas também existe a presença significativa da atividade industrial, além da geração de energia elétrica por pequenas centrais hidrelétricas e diluição de efluentes domésticos e industriais. O uso múltiplo dos recursos hídricos na bacia tem provocado conflitos, a exemplo do ocorrido na estiagem de 1998, conflitos estes entre o uso industrial e a geração de energia elétrica. A demanda principal de água na bacia é a de abastecimento humano, que atende a demanda local e é parcialmente exportada para atender parte da RMR. O início da adução das águas da barragem de Pirapama, concluída em 2001, modificou o quadro atual dos usos da água na bacia, aumentando significativamente o volume de água destinado ao abastecimento público. Segundo Falcão Neto (2003), a operação da barragem Pirapama reduziu a vazão disponível no trecho a jusante, inviabilizando a geração de energia e alterando as condições da vida aquática no rio Pirapama.

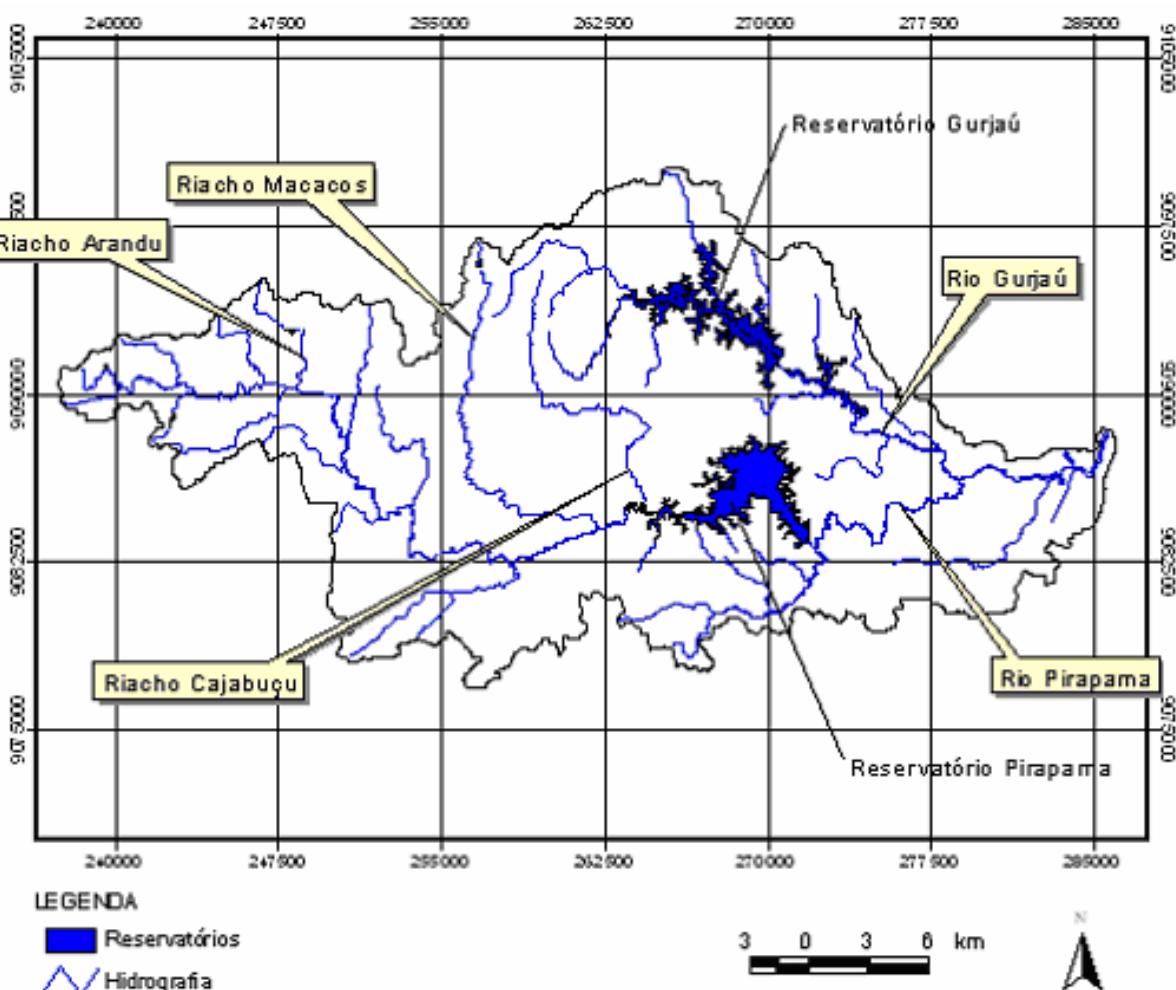


Figura 2.1 - Hidrografia, localização dos principais rios e reservatórios da bacia do rio Pirapama.

## 2.2 O Comitê de Bacia Hidrográfica: Breve Histórico

O Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio Pirapama – COBH-Pirapama, o primeiro comitê no Estado de Pernambuco, foi instalado em junho de 1998 em resposta aos requisitos legais instituídos pela Lei Estadual 11.426/97, a qual define a Política e o Sistema Estadual de Recursos Hídricos em Pernambuco. Os comitês de bacias hidrográficas são definidos como colegiados constituídos por representantes de órgãos Federais, Estaduais, Municipais e da Sociedade Civil. Nos primeiros três anos de existência, o COBH-Pirapama realizou seis reuniões ordinárias e 25 reuniões extraordinárias. As ações e decisões do Comitê podem ser enquadradas em três grandes temáticas: o funcionamento interno (aprovação do regimento, aprovação e revisão do estatuto, capacitação dos membros), planejamento (definição da Estratégia para o Plano de Desenvolvimento Sustentável da Bacia do Pirapama, elaboração e aprovação da Agenda 21<sup>1</sup>, elaboração e aprovação do Zoneamento Ecológico-Econômico para a bacia) e mediação e concretização (gestão e resolução de conflitos entre usuários através da criação de câmaras técnicas e comissões, constituição de parcerias para a implementação das ações da Agenda 21).

O Projeto Pirapama, em representação da CPRH, financiou as primeiras ações do Comitê e, durante o primeiro mandato, a coordenação do Projeto assumiu a sua Secretaria Executiva. No segundo mandato, a Secretaria Executiva foi assumida pela SRH –Secretaria de Recursos Hídricos de Pernambuco (atualmente, a SRH foi incorporada a SECTMA-PE – Secretaria de Ciência Tecnologia e Meio Ambiente de Pernambuco), e o funcionamento do Comitê foi então assegurado pela SECTMA-PE<sup>2</sup> e pelas Prefeituras dos municípios que possuem parte de suas áreas na bacia.

---

<sup>1</sup> A Agenda 21 Global foi elaborada durante a Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento (Rio-92). É o pacto de 177 países para enfrentar em conjunto as crescentes diferenças sociais entre as nações e o comprometimento dos recursos naturais. A Agenda 21 da Bacia do Rio Pirapama confirma o que foi proposto pela Agenda 21 Global e se constitui num Plano de Ação que inclui questões específicas da realidade local. É o compromisso político com o desenvolvimento sustentável, enquanto modelo que concilie crescimento econômico, conservação do meio ambiente e justiça social.

<sup>2</sup> A SECTMA foi criada em 1988, como Secretaria de Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco, pela Lei 10.133. Três anos depois, em 1991, foi extinta e somente recriada em 1993, por força da Lei 10.920, já com a denominação de Secretaria de Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente (SECTMA). Segundo a Lei 1388/2003, a SECTMA passou também a incorporar Recursos Hídricos e Ensino Superior.

### 2.3 Importância da Bacia para a Região Metropolitana do Recife

A captação de água na bacia do rio Pirapama para abastecimento público remonta a década de 1920, com a construção de uma barragem e a primeira adutora de água para a cidade do Recife. Nos últimos anos, após estudos hidrológicos, revelou o rio Pirapama como principal manancial com potencial para atender a Região Metropolitana do Recife. Foi determinado em seguida a construção de uma barragem, denominada de Barragem Pirapama. A água armazenada destina-se, essencialmente, ao abastecimento público da RMR, que abrange cerca de 40% da população.

A Região Metropolitana de Recife é um dos maiores centros industriais do Norte-Nordeste. Nesta região, há restrições ao sistema de esgotamento sanitário, que abrange apenas 22% da área dos municípios, cujos esgotos são lançados com tratamento deficiente no estuário do Pina, local de desembocadura dos Rios Jiquiá e Tejipió. Portanto, essa região recebe uma elevada carga poluidora de metais pesados, principalmente no estuário do Pina.

Em conjunto, os municípios integrantes da bacia abrigam 900.627 habitantes, dos quais 62% residentes em áreas urbanas. A maior proporção da área da Bacia encontra-se situada no território do município do Cabo de Santo Agostinho (57,2%), ao que se segue Moreno (13,7%), Escada (11,8%), Vitória de Santo Antão (9,5%), Pombos (4,3%) e Jaboatão dos Guararapes (2,4%). O município de Ipojuca participa em apenas 1,1% na área da bacia.

As sedes dos municípios integrantes da Bacia encontram-se articuladas por um sistema viário pouco integrado, deficitário, tendo a cidade do Recife como pólo de irradiação, isto é, com a função de concentração e dispersão das rotas comerciais e de migração da região. A área possui dois grandes eixos estruturados, de caráter interestadual, as Rodovias Federais BR-101 e BR-232, e duas vias de importância intermunicipal, a PE-60 e PE-45, além de eixos de importância localizada.

O principal problema da bacia é, atualmente, a degradação ambiental generalizada associada aos processos de ocupação do território para habitação e para o desenvolvimento de atividades agro-industriais. A degradação substancial dos ecossistemas naturais na bacia do rio Pirapama é agravada pelas precárias condições de vida da população. A precariedade social e econômica das condições de vida da população residente na bacia resulta, em parte, num processo de ocupação do território também precário e acompanhado pelo contínuo desmatamento de remanescentes florestais. A expansão da área de cultivo da cana-de-açúcar tem resultado numa forte erosão dos solos, causando assoreamento dos cursos d'água e a poluição dos recursos hídricos da bacia. Esta dinâmica é complementada pelas atividades

agrícolas dos pequenos produtores rurais, os quais ocupam as margens dos córregos e rios e também contribuem para o processo de desmatamento. Nas áreas nobres, a especulação imobiliária tem determinado a ocupação de mangues e também do desmatamento de florestas. Este processo de lapidação do território da bacia é agravado pela poluição por esgoto doméstico resultante das deficientes condições sanitárias associadas à ocupação irregular do solo e pela poluição difusa das agroindústrias existentes na região (GAMA, 2003).

A despeito dos diferentes problemas identificados, a bacia do Pirapama constitui uma alternativa para o aumento da oferta de água na Região Metropolitana do Recife, pois apresenta um conjunto de elementos de natureza física, social, cultural, econômica e ecológica capaz de potencializar ações de desenvolvimento fundamentadas na sustentabilidade ambiental da área. A própria localização da bacia, com cerca de dois terços de sua área na Região Metropolitana do Recife, é um diferencial positivo. Isso lhe confere uma posição privilegiada na definição de políticas de desenvolvimento local articuladas com o centro metropolitano e outros centros regionais (CPRH/DFID, 1998).

## 2.4 Informações Pluviométricas Disponíveis

Na bacia hidrográfica do rio Pirapama e na sua proximidade, três postos pluviométricos foram utilizados nesta pesquisa, dos quais, dois sob administração da Agência Nacional de Águas – ANA, e um pela Companhia Pernambucana de Saneamento – COMPESA, como podem ser vistos na Tabela 2.1e na Figura 2.2.

Tabela 2.1 - Descrição dos postos pluviométricos utilizados

Nome	Latitude	Longitude	Período de dados
Pirapama	-08° 16' 43"'	-35° 03' 50"'	1987-2001
Pombos	-08° 09' 00"'	-35° 22' 48"'	1985-2001
Engenho Cachoeirinha	-08° 13' 32"'	-35° 16' 37"'	1984-2001

## 2.5 Informações Fluviométricas Disponíveis

Foram identificados sete postos fluviométricos com dados diários, dos quais quatro sob responsabilidade da ANA e três sob responsabilidade da COMPESA, de acordo com o levantamento feito a respeito da rede de postos de vazão na bacia do rio Pirapama. Apesar da

grande quantidade de postos existentes na bacia, apenas dados dos postos Pirapama, Destilaria Inexport, Ponte PE-35 e Destilaria Bom Jesus, foram utilizados na pesquisa. A Tabela 2.2 apresenta informações mais detalhadas destes postos. Dos postos citados na Tabela 2.1, o posto Pirapama é o único que possui dados observados numa série representativa para a análise da vazão da bacia (1987-2000). A Figura 2.3 mostra a precipitação média mensal calculada a partir do método de Thiessen, e a vazão observada do posto Pirapama.

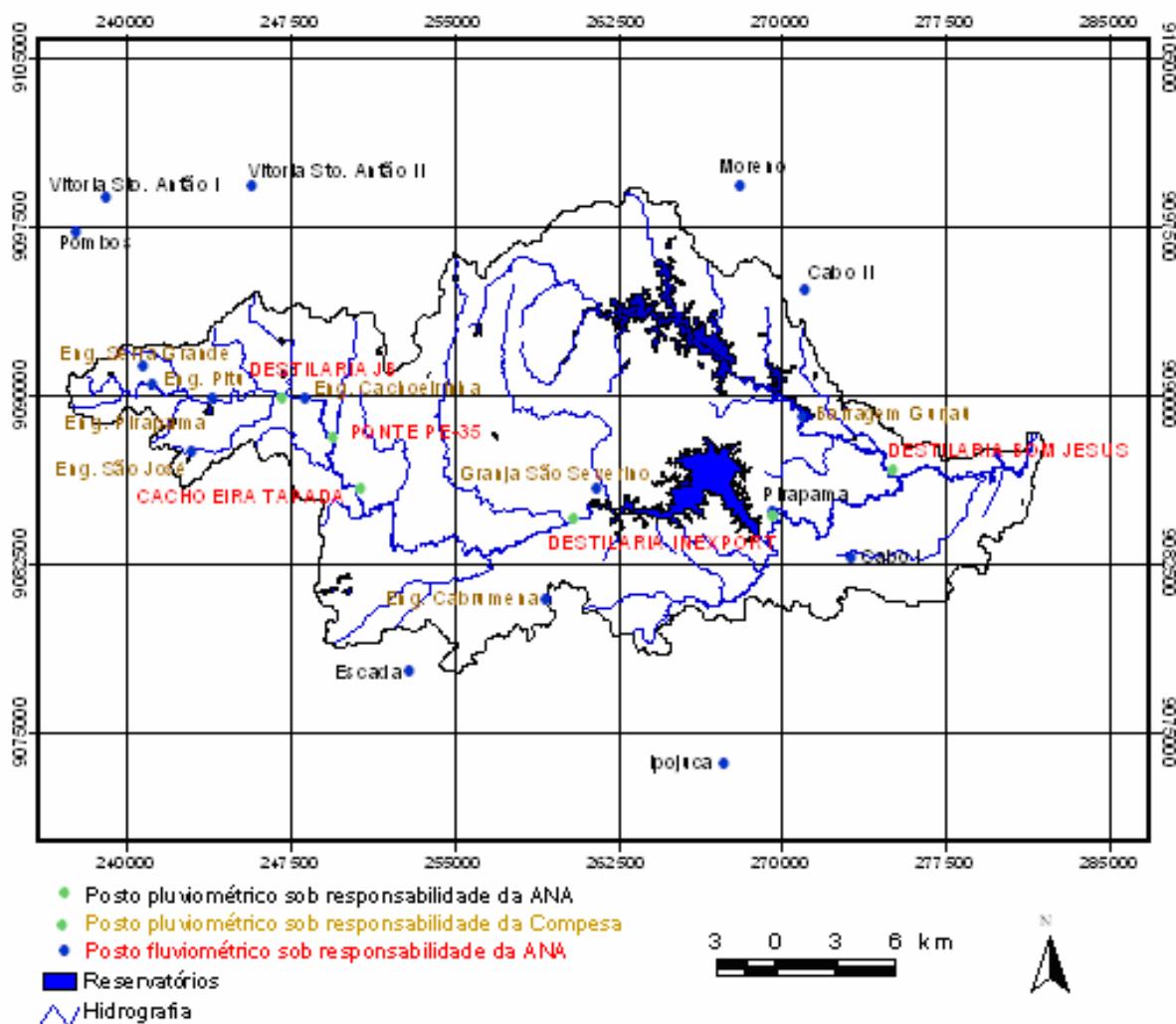


Figura 2.2 - Localização dos postos pluviométricos e fluviométricos existentes na bacia.

Tabela 2.2 - Descrição dos postos fluviométricos utilizados

Nome	Latitude	Longitude	Período de dados
Pirapama	-08° 16' 43"	-35° 03' 50"	1987-2001
Destilaria Inexport	-08° 17' 11"	-35° 09' 22"	2001-2001
Ponte PE-35	-08° 13' 11"	-35° 20' 45"	2001-2001
Destilaria Bom Jesus	-08° 17' 58"	-35° 01' 48"	2001-2001

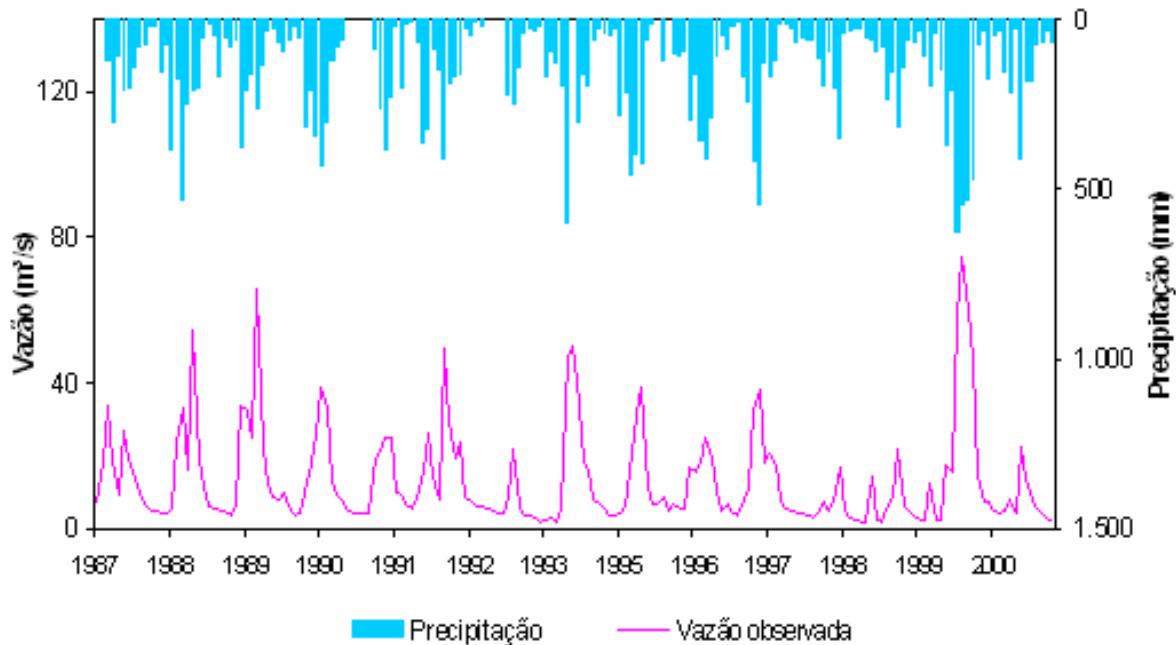


Figura 2.3 - Hietograma e hidrograma observados para o posto Pirapama entre 1987 e 2001.

## 2.6 Características Físico-Climatológicas

Com relação às características físicas, os terrenos da bacia são caracterizados por uma topografia ondulada, constituídos por sedimentos areno-argilosos da Formação Barreiras que dão origem aos solos do tipo Latossolos vermelho-amarelos.

A cobertura vegetal da região não apresenta mais a exuberância e a heterogeneidade primitiva da Mata Atlântica. Nos dias de hoje foi quase totalmente retirada em detrimento ao plantio da cana-de-açúcar e também pela exploração da madeira para a construção de engenhos e exportação em larga escala, principalmente para países europeus.

Quanto ao regime de chuvas, a região possui dois períodos bem definidos: (a) seco, entre os meses de setembro de um determinado ano e março do ano seguinte, com precipitação média mensal menor do que 60 mm e evaporação que excede a precipitação; (b) chuvoso, entre os meses de março e setembro de um mesmo ano, no qual o balanço hidrológico é positivo.

O clima é tipicamente tropical, quente e úmido, com a temperatura variando na faixa dos 26°C a 28°C. A precipitação e a evaporação médias anuais na região ficam em torno de 1500 mm e 1200 mm, respectivamente (STRETTA, 2000).

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No presente capítulo, serão tratados brevemente sobre os aspectos mais importantes para a fundamentação teórica abordada neste trabalho. Dentre os temas pesquisados e revisados na literatura, são abordados temas como: (a) projeção e crescimento populacional; (b) previsão para o abastecimento d'água urbano; (c) modelagem hidrológica de bacias periurbanas; (d) sistema de abastecimento de água da Região Metropolitana do Recife; (e) modelos hidrológicos; (f) modelos de operação de reservatório; (g) *downscaling* e acoplamento entre modelos climáticos e hidrológicos; (h) importância na utilização do sistema de informações geográficas para o gerenciamento dos recursos hídricos; e (i) assoreamento de reservatórios.

Devido ao fato do crescimento populacional ocorrido em praticamente todas as partes do Brasil, o planejamento do uso racional dos recursos hídricos se tornou vital para o desenvolvimento dessas áreas. Atualmente, uma das maiores preocupações de muitas regiões do planeta, e mais precisamente dos grandes centros urbanos, é com a problemática da escassez dos recursos hídricos, onde a gestão da água tornou-se a principal prioridade nesses locais. Assim, para o planejamento efetivo do uso desses recursos, é essencial o conhecimento da distribuição espacial e temporal das potencialidades hídricas de uma bacia hidrográfica.

O gerenciamento dos recursos hídricos e o seu manejo racional têm levado pesquisadores a tentar prever as relações meteorológicas e hidrológicas a partir da utilização de modelos de simulação e previsão, principalmente na modelagem chuva-vazão. Todini (1988) aponta o desenvolvimento contínuo da modelagem matemática como uma chave para solucionar os requisitos necessários em estudos de modelagem hidrológica, uma vez que a

previsão de vazão é um dos principais desafios relacionados com o conhecimento integrado das características físicas e hidrológicas da bacia e da climatologia regional.

### 3.1 Projeção, Crescimento Populacional e Previsão de Abastecimento de Água

A projeção populacional consiste no tratamento estatístico de tendências passadas e sua projeção para o futuro, levando em conta possíveis tendências regressivas ou progressivas que venham a mudar o comportamento até então observado.

Ainda hoje, o homem não conseguiu estabelecer um método exato para determinar precisamente o crescimento da população humana. De acordo com a revisão elaborada, os principais métodos utilizados para as projeções populacionais conhecidos são o crescimento aritmético, crescimento geométrico, regressão multiplicativa, taxa decrescente de crescimento, curva logística, comparação gráfica entre cidades similares, e o método da razão e correlação. Estes métodos podem ser conferidos mais detalhadamente em Fair et al. (1968), CETESB (1978), Qasim (1985), Metcalf e Eddy (1991), Viana (2000) e Gomes (2002).

A partir dos métodos propostos pela literatura, as projeções populacionais para todos os municípios constituintes da Região Metropolitana do Recife – RMR foram calculadas utilizando o método de crescimento aritmético, a partir da equação (1), como mostrado na Tabela 3.1. Esse método foi escolhido e aplicado, uma vez que os resultados da projeção populacional apresentaram um melhor ajuste para essa opção e, segundo Gomes (2002), os resultados obtidos devem ser coerentes com a densidade populacional da área em questão.

$$P_t = P_0 + K_a (t - t_0) \quad (1)$$

onde  $P_t$  é a população estimada no ano  $t$  a partir da população inicial ( $P_0$ ) no ano  $t_0$ , com taxa de crescimento populacional ( $K_a$ ). A taxa de crescimento da população ( $K_a$ ) é dada em função do tempo ( $dP/dt$ ):

$$K_a = \frac{P_2 - P_0}{t_2 - t_0} \quad (2)$$

onde  $P_2$  e  $P_0$  são respectivamente as populações nos anos  $t_2$  e  $t_0$  de acordo com os censos demográficos mais recentes.

Tabela 3.1 - Projeção populacional para os municípios da RMR

<b>Municípios</b>	<b>2005</b>	<b>2010</b>	<b>2015</b>	<b>2020</b>	<b>2025</b>	<b>2030</b>
Abreu e Lima	95.708	102.377	109.046	115.715	122.383	129.052
Cabo de Santo Agostinho	167.389	181.800	196.212	210.624	225.035	239.447
Camaragibe	144.977	161.252	177.527	193.802	210.077	226.352
Igarassu	83.633	84.988	86.344	87.699	89.055	90.410
Ipojuca	66.979	74.678	82.376	90.074	97.773	105.471
Itamaracá	18.220	20.582	22.945	25.307	27.669	30.031
Itapissuma	22.176	24.236	26.296	28.356	30.416	32.476
Jaboatão dos Guararapes	634.021	686.486	738.951	791.416	843.881	896.346
Moreno	54.801	60.397	65.993	71.589	77.186	82.782
Olinda	382.629	397.355	412.082	426.809	441.535	456.262
Paulista	290.429	318.621	346.814	375.006	403.198	431.390
<b>Recife</b>	<b>1.492.169</b>	<b>1.561.434</b>	<b>1.630.698</b>	<b>1.699.963</b>	<b>1.769.227</b>	<b>1.838.492</b>
São Lourenço da Mata	92.925	95.448	97.970	100.493	103.016	105.539
<b>TOTAL</b>	<b>3.546.056</b>	<b>3.769.655</b>	<b>3.993.254</b>	<b>4.216.853</b>	<b>4.440.451</b>	<b>4.664.050</b>

Ainda de acordo com a Tabela 3.1, percebe-se que as cidades de Recife e Jaboatão dos Guararapes apresentam a maior concentração populacional em relação às demais cidades que compõem a RMR, fazendo com que suas projeções para 2030 mereçam destaque em relação aos outros municípios. Nesse sentido, os recursos hídricos da bacia do rio Pirapama desempenham papel fundamental no desenvolvimento da RMR, uma vez que essa região já apresenta problemas ambientais e de conflito de uso da água (RIOS, 2000).

Assim, a previsão de demanda é um instrumento necessário para o dimensionamento da oferta e para o direcionamento de medidas de gestão da demanda, principalmente para a RMR.

Para a solução dos complexos problemas de planejamento e gestão de recursos hídricos, é necessário a utilização de técnicas e ferramentas capazes de auxiliar nos processos de análise, operação, planejamento e tomada de decisão. Dentre essas ferramentas, o emprego de modelos computacionais é de fundamental importância em estudos de previsão de abastecimento d'água nas cidades.

Atualmente, inúmeros trabalhos vêm realizando o acoplamento entre a previsão de demanda d'água e modelos de simulação. Esses modelos são alimentados por demandas de consumo de água existentes ou por demandas previstas. O objetivo de se utilizar um modelo de previsão de consumo de água é reduzir incertezas, servindo de base para a programação operacional e tomada de decisões.

Jain e Ormsbee (2002) desenvolveram um importante trabalho para previsões de demanda de água em curto prazo, ilustrando de forma educativa as técnicas utilizadas para

modelos de previsão. Criaram oito modelos de previsão de demanda de água diária utilizando métodos convencionais e métodos de sistemas inteligentes, e fizeram comparações entre os resultados dos diversos métodos com o objetivo de otimizar o custo de energia na operação de um sistema.

Borges (2003) realizou o acoplamento de um modelo de previsão de demanda de água num modelo simulador em tempo real no sistema adutor da Região Metropolitana de São Paulo, onde buscou avaliar a melhoria na performance da operação com o uso de um modelo de previsão de demanda de água.

Mais recentemente, os estudos de previsão de demanda hídrica urbana vêm utilizando métodos computacionais mais modernos, como os realizados por Joo et al. (2002), no qual foi aplicado um modelo de previsão de demanda diária de água usando a técnica de redes neurais para a cidade de Seul, na Coréia do Sul.

Stark (2002) também desenvolveu um modelo de demanda de água utilizando redes neurais para a cidade de Edmonton, Canadá, entretanto, este modelo considerava fatores meteorológicos, como temperatura e precipitação nos cálculos da previsão do abastecimento de água.

### **3.2 Sistema de Abastecimento de Água da Região Metropolitana do Recife**

Este item apresenta a atual situação do sistema de abastecimento de água da RMR, suas características e seus problemas. No segundo momento aborda a situação atual e a vulnerabilidade do sistema de abastecimento de água da RMR, além de enfatizar o funcionamento dos principais reservatórios do sistema de abastecimento da RMR.

A cidade do Recife, que mais tarde vai dar origem a RMR, teve seu nome atribuído pela presença de um dique natural, Recife ou Arrecife, constituído de arenito e microrganismos. A RMR ocupa um espaço geográfico rico em recursos hídricos, sendo cortada por uma vasta rede fluvial de rios perenes. A sua rede hidrográfica conta com inúmeras bacias, destacando-se, entre outros, os rios Beberibe, Bita, Botafogo, Capibaribe, Duas Unas, Paratibe e Tapacurá. Entretanto, alguns desses rios se encontram totalmente poluídos, sendo necessário a captação d'água de barragens construídas fora dos limites geográficos da RMR. Mesmo assim, em alguns casos, a água captada além da RMR também é poluída, a exemplo do subsistema Tapacurá, cuja barragem fica a 27 km do Recife, a qual ainda recebe grande quantidade de esgotos e recebia também lixos e resíduos de indústrias e residências que se

encontravam as margens do rio Tapacurá, principalmente nas áreas urbanas das cidades de Vitória de Santo Antão e Pombos (NASCIMENTO, 2003).

A RMR ocupa atualmente um vasto espaço geográfico com 2.745,3 km<sup>2</sup>, contando com catorze municípios: Abreu e Lima, Araçoiaba, Cabo de Santo Agostinho, Camaragibe, Ipojuca, Itamaracá, Itapissuma, Igarassu, Jaboatão dos Guararapes, Moreno, Olinda, Paulista, Recife e São Lourenço da Mata, que juntos totalizam 3.322.457 habitantes, sendo que, segundo COMPESA/GEOSISTEMAS (2000), 3.114.336 recebem água do sistema geral de abastecimento e 107.864 têm seus abastecimentos isolados. Os habitantes das cidades de Ipojuca, Itapissuma, Ilha de Itamaracá e Moreno não estão interligados aos grandes subsistemas da COMPESA.

Para Falcão Neto (2002), o elevado nível de degradação dos mananciais existentes na RMR e o assoreamento dos rios são apontados como os responsáveis por vários problemas que poderão causar prejuízos para a população da bacia, como o aumento da produção de sedimentos acarretando na diminuição do tempo de vida útil dos reservatórios locais, riscos de proliferação de doenças transmissíveis pela água, aumento nos custos financeiros da COMPESA com o tratamento da água, e riscos de inundações em decorrência do lixo depositado nas margens e adjacências dos rios.

### 3.2.1 Situação atual e vulnerabilidade do sistema de abastecimento de água da RMR

No Estado de Pernambuco, no período entre 1994 a 1998, não aconteceram melhorias do sistema de abastecimento de água da RMR. Nesse período houve apenas a elaboração de leis por técnicos da Secretaria de Ciência, Tecnologia e Meio Ambiente – SECTMA, seguindo diretrizes de leis nacionais. Segundo Rios (2000), essas leis têm por objetivo implantar normas que deverão controlar o uso dos recursos hídricos no Estado de Pernambuco, estabelecendo outorga temporária pelo uso da água obtida nos mananciais de superfície e/ou subterrâneos, seja por empreendimentos públicos ou privados.

Nascimento (2003) comparou a situação do volume de água das barragens responsáveis pelo abastecimento d’água na RMR entre 1995 e 1999, antes da construção do reservatório Pirapama, e constatou que mesmo com todos os reservatórios de água responsáveis pelo abastecimento da RMR cheios, o racionamento persistiu. Para a realização do estudo, analisou os dados relacionados ao racionamento de água dos meses de fevereiro e junho de 1997,

períodos do ano em que os reservatórios se encontravam com o menor e maior volumes de água, respectivamente.

De acordo com a Tabela 3.2, nesse período houve apenas pequenas alterações no abastecimento das cidades de Camaragibe e São Lourenço da Mata, que em fevereiro contavam com um regime de 48h com água e 30h sem água e em junho, passou para 38h com água e 34h sem água, havendo então uma diminuição na oferta de água para os habitantes das duas cidades. No período em que os reservatórios estavam cheios, as demais cidades da RMR continuaram sem alterações.

O racionamento foi ampliado a partir de 1998, por conta da grande estiagem que teve início em 1997 e, devido ao baixo volume de água armazenado nas barragens após o dia primeiro de agosto de 1998, montou-se um novo esquema de racionamento para a RMR, passando todos os bairros ao regime de vinte e quatro horas com água e quarenta e oito horas sem água. Em 1999 a situação foi ainda mais crítica, obrigando o Governo do Estado de Pernambuco a ampliar o período de racionamento de água que, em algumas áreas, chegou a funcionar no regime de um dia com água e nove dias sem água.

A Figura 3.1 demonstra o esquema de racionamento de água da RMR no primeiro semestre de 1997, onde se percebe que os municípios de Camaragibe e São Lourenço da Mata apresentaram os maiores períodos de racionamento (40h com água e 30h sem água). Já Recife, foco de maior concentração populacional da região, chegou a possuir em 1998 um racionamento de 20h com água e 20h sem água.

A partir de tal problema, foram construídas obras emergenciais, como a adutora de Arataca, para subsidiar o sistema de Botafogo, responsável por parte do abastecimento de água potável da área Norte, e a adutora de Ipojuca, para aumentar a vazão do sistema de Suape, responsável pelo abastecimento do Complexo Portuário de Cabo de Santo Agostinho e uma parte da zona Sul do Recife. Outras medidas também foram realizadas, como: a ampliação dos subsistemas já existentes e a realização de obras estruturais para o abastecimento de água em todo Estado de Pernambuco. Entre as obras prioritárias se destacavam as ampliações do Sistema Tapacurá, a implantação de adutoras e a construção de reservatórios para distribuição de água dos poços perfurados no início de 1999 na bacia do rio Beberibe, em Olinda e a conclusão das obras dos sistemas de Pirapama e Várzea do Una (NASCIMENTO, 2003).

Tabela 3.2 - Período de racionamento de água na RMR em 1997

Áreas de Abastecimento	Fevereiro		Junho	
	Com Água	Sem Água	Com Água	Sem Água
Abreu e Lima	24h	24h	24h	24h
Cabo de Santo Agostinho	20h	28h	20h	28h
Camaragibe	48h	30h	38h	34h
Igarassu	24h	24h	24h	24h
Jaboatão dos Guararapes (velho)	18h	6h	18h	6h
Jaboatão dos Guararapes (novo)	24h	24h	24h	24h
Olinda	24h	24h	24h	24h
Paulista	24h	24h	24h	24h
Recife	20h	28h	20h	28h
São Lourenço da Mata	48h	30h	38h	34h

Fonte: Nascimento (2003).



Figura 3.1 - Espacialização do regime de distribuição d'água na RMR em fevereiro de 1997 e localização da bacia do rio Pirapama (adaptado de NASCIMENTO, 2003).

Segundo Falcão Neto (2002), a concretização do subsistema Pirapama representou uma melhoria significativa para o abastecimento de água da região, pois até então se todas as barragens estivessem cheias e se os subsistemas Alto do Céu, Caixa d'Água, Tapacurá, Botafogo, Gurjaú, Suape e Poços tivessem em funcionamento normal, eles juntos só conseguiriam produzir aproximadamente 10.000 l/s, e o subsistema Pirapama poderia contribuir sozinho com mais de 3.000 l/s. Sendo, portanto, um alento aos problemas relacionados ao fornecimento d'água da RMR. A Figura 3.2 representa a modelagem da bacia Pirapama e os equipamentos instalados ao longo do seu curso. Podem ser vistos também os reservatórios responsáveis pelo abastecimento de água da RMR.

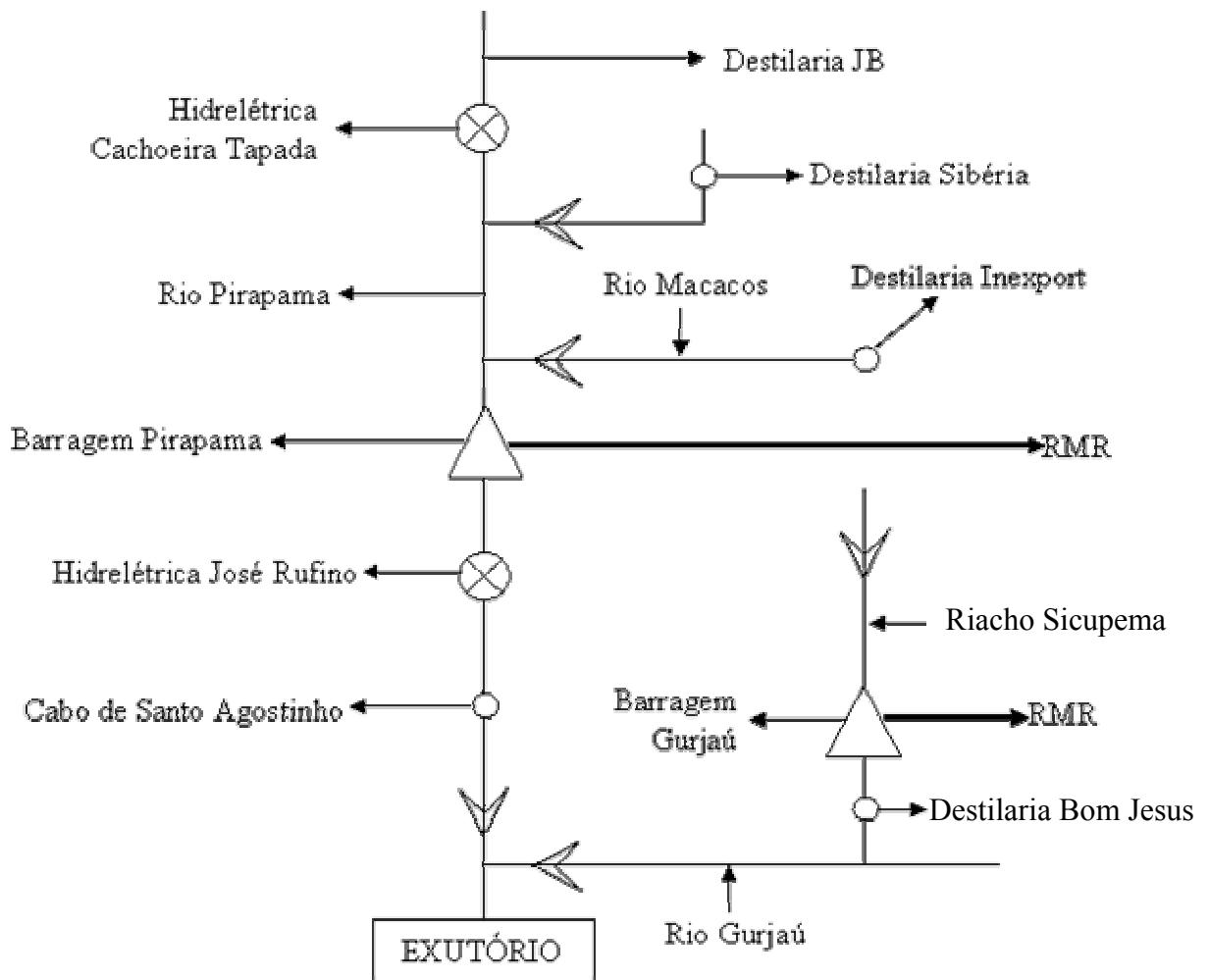


Figura 3.2 - Modelagem da bacia hidrográfica do rio Pirapama (adaptado de RIOS, 2000).

### 3.2.2 Funcionamento dos principais sistemas de abastecimento de água da RMR

O atual sistema de abastecimento de água da RMR é formado por sete barragens de maior porte e suas respectivas ETAs: Tapacurá e Várzea do Una em São Lourenço da Mata, Duas Unas em Jaboatão dos Guararapes, ETA Presidente Castelo Branco; Bita Utinga em Ipojuca, ETA Suape; Gurjaú no Cabo de Santo Agostinho, ETA Gurjaú e Botafogo em Igarassu, ETA Botafogo e outras pequenas barragens que servem apenas para regular o nível da água para a captação, como é o caso da barragem de Pitanga em Igarassu.

Existem vários pontos de captação a fio d'água instalados diretamente nos rios: Arataca em Goiana, Cumbe e Pilão em Araçoiaba, Conga e Tabatinga em Igarassu, Paratibe em Paulista, Caixa d'água em Olinda, Castelo II em São Lourenço da Mata e mais de cento e cinqüenta poços, que juntos em período normal produzem uma vazão de aproximadamente 10.000 l/s (COMPESA, 1986).

Na Tabela 3.3 podem ser vistas as potencialidades de produção de água dos maiores subsistemas, através dos pontos de captação de água da RMR e seus respectivos mananciais, mostrando ainda que os mesmos foram construídos há mais de quinze anos: subsistema Alto do Céu, que tem como mananciais os rios Utinga, Pitanga, Paratibe e Beberibe; subsistema de Caixa D'água, que tem como manancial o rio Beberibe, que foi construído na década de 60; subsistema de Tapacurá, que conta com os rios de Tapacurá, Tiúma, Duas Unas e Capibaribe, construído na década de 1970.

Na década de 80 foram construídos os subsistemas de: Botafogo, que tem como mananciais os rios Arataca, Catucá, Cumbe, Monjope, Tabatinga e Pilão; subsistema de Gurjaú, que tem como manancial o rio Gurjaú e o subsistema de Suape, que conta com os rios Bita e Utinga.

Nascimento (2003) obteve informações junto a COMPESA sobre a quantidade de água acumulada nos maiores reservatórios da RMR e elaborou as Tabelas 3.4, 3.5, 3.6, 3.7, 3.8, 3.9 e 3.10, que mostram os dados referentes aos níveis observados dos reservatórios que abastecem RMR. A barragem de Botafogo, por exemplo, em 05 de outubro de 1995 (Tabela 3.4), possuía aproximadamente 15 milhões de m<sup>3</sup>, o que representava 55,9% de sua capacidade máxima; em 29 de fevereiro de 1996 (Tabela 3.5), contava com apenas 24% de sua capacidade de acumulação; já em 30 de junho do mesmo ano a barragem Botafogo encontrava-se com 43% de sua reserva (Tabela 3.6).

Esse aumento do volume armazenado na barragem deve ser atribuído, segundo Nascimento (2003), por 1996 ter sido um ano em que o período chuvoso foi considerado como regular, com média pluviométrica de 2.358,7 mm. Para os dados de 31 de julho de 1998, a barragem Botafogo apresentava um volume de água armazenada de apenas 21% do seu total (Tabela 3.7), apresentando uma queda significativa de água armazenada em relação aos dados de 1996, devido ao fato de 1998 ter sido considerado “seco” do ponto de vista climático. Esse período de “seca” na região persistiu até o início de 1999, quando a barragem Botafogo chegou a possuir apenas 4,31% do seu volume máximo (Tabela 3.8). A partir de maio de 1999, foi observado um volume de água na barragem de aproximadamente 27 milhões de m<sup>3</sup>, como mostrado na Tabela 3.9. A Tabela 3.10 mostra que o volume de água armazenada na barragem Botafogo chegou a atingir 97,7% do seu total, em 4 de novembro de 2001.

Tabela 3.3 - Pontos de captação de água da RMR

Subsistema	Captação	Vazão l/s	Área Atendida	Época de Construção
Alto do Céu	Monjope	739	Recife e Morros da Zona Norte	Década de 1960
	Beberibe	301		
	Paratibe	226		
	Sub Total	1.266		
Caixa d'Água	Beberibe	237	Morros/Norte	Década de 1960
Tapacurá	Tapacurá	1.353	Zona Oeste/ Sul	Década de 1970
	Duas Unas	1.069		
	Tiúma	397		
	Castelo	523		
	Várzea/Una	481		
	Sub Total	3.823		
Botafogo	Catucá	852	Zona Norte	Década de 1980
	Conga	103		
	Tabatinga	131		
	Pilão	217		
	Cumbe	102		
	Monjope	183		
	Sub Total	1.588		
Gurjaú	Gurjaú	1.035	Cabo de Santo Agostinho	Década de 1980
Suape	Bita	419	Suape/Cabo de Santo Agostinho e parte da zona Sul	Década de 1980
	Utinga	322		
	Sub Total	741		
<b>Total Geral</b>		<b>16.108</b>		

Fonte: Nascimento (2003).

Tabela 3.4 - Volume de água acumulada nos reservatórios da RMR no dia 05/10/95

Barragens	Rio	Volume Armazenado (m <sup>3</sup> )	Volume (%)	Volume Máximo (m <sup>3</sup> )
Tapacurá	Tapacurá	80.087.662	85,0	94.200.000
Duas Unas	Duas Unas	16.225.816	67,1	24.199.000
Várzea do Una	Várzea do Una	11.556.226	99,9	11.568.010
Bita	Bita	2.830.174	Vertendo	2.770.000
Utinga	Utinga	9.962.833	95,0	10.426.047
Botafogo	Catucá	15.438.712	55,9	27.595.036
Sicupema	Gurjaú	3.203.611	Vertendo	3.203.611

Fonte: Nascimento (2003).

Tabela 3.5 - Volume de água acumulada nos reservatórios da RMR no dia 29/02/96

Barragens	Rio	Volume Armazenado (m <sup>3</sup> )	Volume (%)	Volume Máximo (m <sup>3</sup> )
Tapacurá	Tapacurá	65.218.784	69,23	94.200.000
Duas Unas	Duas Unas	10.512.922	43,48	24.199.000
Várzea do Una	Várzea do Una	8.399.435	72,61	11.568.010
Bita	Bita	2.693.162	97,23	2.770.000
Utinga	Utinga	8.293.500	61,76	10.426.047
Botafogo	Catucá	6.759.311	24,00	27.595.036
Sicupema	Gurjaú	2.033.536	63,55	3.203.611

Fonte: Nascimento (2003).

Tabela 3.6 - Volume de água acumulada nos reservatórios da RMR no dia 30/06/96

Barragens	Rio	Volume Armazenado (m <sup>3</sup> )	Volume (%)	Volume Máximo (m <sup>3</sup> )
Tapacurá	Tapacurá	73.676.077	78,21	94.200.000
Duas Unas	Duas Unas	24.156.388	99,82	24.199.000
Bita	Bita	2.770.942	Vertendo	2.770.000
Utinga	Utinga	10.455.565	Vertendo	10.426.047
Botafogo	Catucá	11.940.530	43,27	27.595.036
Sicupema	Gurjaú	3.203.610	Vertendo	3.203.611

Fonte: Nascimento (2003).

Tabela 3.7 - Volume de água acumulada nos reservatórios da RMR no dia 31/07/98

Barragens	Rio	Volume Armazenado (m <sup>3</sup> )	Volume (%)	Volume Máximo (m <sup>3</sup> )
Tapacurá	Tapacurá	20.200.000	22,08	94.200.000
Duas Unas	Duas Unas	8.900.000	37,05	24.199.000
Bita	Bita	1.100.000	41,78	2.770.000
Utinga	Utinga	3.600.000	35,4	10.426.047
Botafogo	Botafogo	5.700.000	20,84	27.595.036
Sicupema	Sicupema	1.800.000	57,2	3.203.611

Fonte: Nascimento (2003).

Tabela 3.8 - Volume de água acumulada nos reservatórios da RMR no dia 19/02/99

<b>Barragens</b>	<b>Rio</b>	<b>Volume Armazenado (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Volume (%)</b>	<b>Volume Máximo (m<sup>3</sup>)</b>
Tapacurá	Tapacurá	6.300.000	67,0	94.200.000
Duas Unas	Duas Unas	3.900.000	16,2	24.199.000
Botafogo	Catucá	1.100.000	4,31	27.595.036

Fonte: Nascimento (2003).

Tabela 3.9 - Volume de água acumulada nos reservatórios da RMR no dia 05/09/99

<b>Barragens</b>	<b>Rio</b>	<b>Volume Armazenado (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Volume (%)</b>	<b>Volume Máximo (m<sup>3</sup>)</b>
Tapacurá	Tapacurá	9.420.000	10,0	94.200.000
Duas Unas	Duas Unas	15.487.360	64,0	24.199.000
Bita	Bita	2.603.800	94,0	2.770.000
Utinga	Utinga	3.753.560	36,0	10.426.047
Botafogo	Catucá	3.863.300	14,0	27.595.036
Sicupema	Gurjaú	3.043.430	95,0	3.203.611

Fonte: Nascimento (2003).

Tabela 3.10 - Volume de água acumulada nos reservatórios da RMR no dia 04/11/2001

<b>Barragens</b>	<b>Rio</b>	<b>Volume Armazenado (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Volume (%)</b>	<b>Volume Máximo (m<sup>3</sup>)</b>
Tapacurá	Tapacurá	67.600.000	71,8	94.200.000
Duas Unas	Duas Unas	21.900.000	90,7	24.199.000
Bita	Bita	2.020.000	73,0	2.770.000
Utinga	Utinga	8.700.000	83,6	10.426.047
Botafogo	Catucá	26.900.000	97,7	27.595.036
Sicupema	Gurjaú	3.043.430	95,0	3.203.611

Fonte: Nascimento (2003).

Entre 1998 e 1999, o Governo do Estado decretou “situação de emergência” na RMR, por estar convivendo com o maior racionamento de água da sua história. Como parte do programa emergencial, foram construídas as adutoras de Arataca em Goiana, para subsidiar o subsistema de Botafogo Zona Norte, e a de Ipojuca para aumentar o volume de água do subsistema de Suape e da Zona Sul, responsáveis pela diminuição no esquema de racionamento da região.

Em outras palavras, as tabelas apresentadas mostram resumidamente o comportamento dos níveis dos reservatórios da RMR. Esses reservatórios, assim como os demais que se encontram na região Nordeste do Brasil, são influenciados por fatores, como: altas taxas de evaporação na maior parte do ano, longos períodos de estiagem, e o principal deles, o fornecimento de água para o abastecimento humano. Assim, a realização de estudos de

previsão hidrossedimentológica, são de suma importância para a gestão dos recursos hídricos de uma bacia hidrográfica, principalmente naquelas bacias responsáveis pelo abastecimento de regiões metropolitanas, como é o caso da bacia do rio Pirapama, pois simulam com antecedência cenários futuros a partir das previsões.

### 3.3 Modelagem Hidrológica de Bacias Urbanas

A medida que aumenta a taxa de urbanização, em geral, ocorre o aumento das vazões máximas, crescimento da produção de sedimentos, e a degradação da qualidade da água no meio urbano.

Como o processo de urbanização das últimas décadas tem ocorrido de maneira desordenada nas grandes cidades brasileiras, a impermeabilização da malha urbana tem reduzido a infiltração da água da chuva no solo, aumentando o escoamento superficial, e acarretando possíveis problemas com enchentes. Como consequência desse processo, por exemplo, durante períodos de chuva intensa podem ocorrer inundações e alagamentos devido ao maior volume d'água retido na superfície impermeável da zona urbana. O desenvolvimento urbano desenfreado tem provocado maiores e mais freqüentes inundações. As grandes metrópoles brasileiras, como São Paulo e Recife, dentre muitas outras, sofrem com as grandes enchentes, principalmente no período de verão.

Outro problema relacionado ao processo de urbanização é a obstrução, por sedimentos, de equipamentos urbanos, como portos e reservatórios. Além disso, a ocupação de áreas ao longo do leito dos rios causa grandes transtornos, principalmente nos períodos de inundaçõ natural das várzeas ribeirinhas, causando grandes impactos sócio-econômicos ao meio urbano (SANTOS, 2001a).

Cruz et al. (1998) estimaram, através do uso de um modelo hidrológico de precipitação-vazão, os volumes necessários ao amortecimento das enchentes em lotes. Nesse trabalho foram avaliados seis tipos de reservatórios implantados em lotes característicos da cidade de Porto Alegre, submetidos a aumentos em áreas impermeáveis. O uso desses reservatórios de detenção, associados a superfícies de infiltração nos lotes, possibilitou a redução das vazões de pico a valores compatíveis com os encontrados antes da urbanização.

Santos (2001a) aplicou a técnica de redes neurais artificiais na modelagem do escoamento superficial na cidade de São Paulo, produzindo excelentes resultados na simulação dos processos hidrológicos de transformação de chuva em vazão.

Rosa (2002) desenvolveu a integração de um sistema de informações geográficas (Arcview 3.2) com os modelos hidrológicos, mais especificamente o IPH II. No qual formulou uma metodologia clara e concisa para aquisição de parâmetros fisiográficos da bacia hidrográfica urbana do Rio Morto, localizada na cidade do Rio de Janeiro.

Nos últimos anos, os modelos hidrológicos têm estado presentes no desenvolvimento de diversas áreas do conhecimento humano, científico e das ciências naturais. A importância dos modelos reside, entre outros aspectos, no fato de poder obter relações de causa e efeito de maneira rápida e objetiva, sem realizar ação sobre o modelo físico real.

Em suma, os modelos hidrológicos são empregados para representar e dimensionar a grande diversidade dos processos do ciclo hidrológico, como o escoamento superficial e a infiltração, e são considerados ferramentas importantes em estudos de modelagem hidrológica de bacias periurbanas.

### **3.4 Modelos Hidrológicos**

Como os fenômenos do ciclo hidrológico são extremamente difíceis de serem representados, a utilização de modelos computacionais se torna imprescindível na análise quantitativa e qualitativa desses fenômenos. Esses modelos são extremamente úteis, pois permitem, através da equacionalização dos processos, representar, entender e simular o comportamento de uma bacia hidrográfica (TUCCI, 1998). Para Oliveira (2003), os modelos hidrológicos são usados para simular situações hipotéticas com o objetivo de avaliar impactos de alterações ocorridas no uso e ocupação do solo, atuando também na prevenção de impactos ambientais e hidrológicos, como: (a) a vazão e a infiltração decorrentes de chuvas intensas; (b) a construção de reservatórios; e (c) o efeito do impacto da urbanização numa bacia.

Atualmente, diversos estudos utilizam-se de modelos hidrológicos para a modelagem dos processos físicos numa bacia. A utilidade dessa ferramenta pode ser comprovada em estudos voltados para: simulação hidrológica, estudos de impactos ambientais, dimensionamento de sistemas de abastecimento, avaliação de níveis de reservatórios, operação e controle de cheias, e de drenagem urbana. Portanto, os modelos hidrológicos são essenciais para a análise e simulação da hidrologia numa bacia hidrográfica, atuando como uma ferramenta auxiliar na solução de problemas de planejamento e no processo de tomada de decisão na gestão dos recursos hídricos.

### 3.4.1 Classificação dos modelos hidrológicos

Os modelos hidrológicos podem ser classificados segundo diferentes aspectos, como pode ser visto em Wood e O'Connell (1985), Maidment (1993), e Tucci et al. (1998). De forma geral, os modelos são classificados dentre outras formas, de acordo com o tipo de variáveis utilizadas na modelagem, como:

- (a) **Determinístico** – são aqueles modelos que reproduzem respostas idênticas para o mesmo conjunto de entradas. Mesmo quando uma variável de entrada tiver caráter aleatório, ainda assim o modelo pode ser determinístico, se para cada valor de entrada tiver um único valor de saída.
- (b) **Estocástico** – são aqueles modelos quando uma das variáveis envolvidas na modelagem tem um comportamento aleatório, possuindo distribuição de probabilidade.
- (c) **Empíricos** – são ditos empíricos quando são derivados do conceito e sua formulação não possui nenhuma representação explícita dos processos físicos da bacia, possuindo uma característica regionalista.
- (d) **Conceituais** – são também denominados como modelos baseados em processos, e procuram descrever todos os processos que estão envolvidos no fenômeno estudado. Estes modelos estão fundamentados em formulações físicas, como a equação da continuidade, associada a uma ou mais equações empíricas que relacionam variáveis e parâmetros do processo. Os modelos de base física consideram as equações de conservação de massa, energia e quantidade de movimento, para descrever o movimento das águas sobre a superfície do solo, e nas zonas saturada e não-saturada do terreno. Os sistemas resultantes das equações são resolvidos geralmente através de técnicas de discretização numérica, como por exemplo, o método das diferenças finitas, dos elementos finitos ou dos volumes finitos (TUCCI, 1998). O cálculo é feito para cada célula da malha ou plano discretizado (de acordo com a formulação de cada modelo hidrológico), representando assim, a forma da bacia. Exemplos deste tipo de modelos são o SHE, AGNPS, e Kineros2 e podem ser mais bem estudados respectivamente em Abbott et al. (1986), Yoon (1996) e Santos et al. (2001b).

(e) **Concentrados** – nos modelos concentrados, a área da bacia é representada de forma única, isto é, homogênea, não sendo possível a distribuição das características de parâmetros físicos relacionados ao solo, a vegetação e a chuva. No seu desenvolvimento são atribuídos valores médios representativos para toda a área de acordo com cada parâmetro do modelo. Como exemplos tem-se os modelos IPH II, *Topmodel*, *Answer* e o *Stanford Watershed Model*.

(f) **Distribuídos** – esses modelos permitem que toda a área seja dividida em unidades irregulares ou regulares, assumidas como hidrologicamente homogêneas, reconhecendo desta forma a distribuição espacial das variáveis e dos parâmetros considerados. Este tipo de modelo permite a manipulação de dados de pluviometria levando em consideração sua variabilidade espacial, sendo assim, mais representativa do real (ROSA, 2002).

(g) **Contínuos** – são aqueles que simulam os processos hidrológicos num amplo período, sendo determinada a simulação em todos os períodos, seja de cheia ou de seca.

### 3.5 Previsão Climática, *Downscaling* e Acoplamento de Modelos Climáticos com Hidrológicos

Nos últimos anos, modelos de circulação atmosférica vêm sendo utilizados para efetuar previsões para todas as partes do globo. Essas previsões são realizadas através de modelos hidrodinâmicos que simulam os processos atmosféricos em computadores de alto desempenho.

Atualmente, são vários os centros de pesquisa espalhados pelo mundo com a missão de pesquisar e elaborar previsões sobre o tempo e o clima, como o ECMWF – *European Center for Medium Range Weather Forecasts* na Europa, e o COLA – *Center Ocean Land Atmosphere* nos Estados Unidos. No Brasil, as pesquisas espaciais e climatológicas são conduzidas desde 1995 pelo CPTEC – Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos, localizado no município de Cachoeira Paulista, São Paulo. O CPTEC/INPE é o único centro meteorológico na América Latina que produz previsões numéricas de tempo e clima para o Brasil, e as disponibiliza em forma digital para os usuários no Brasil. Outro importante centro de pesquisas meteorológicas no Brasil é a FUNCENE – Fundação Cearense de Meteorologia, que também desenvolve pesquisas climatológicas para o Brasil.

O desenvolvimento e o aprimoramento desses modelos, com o passar dos anos, tem levado a comunidade científica internacional a adotar e aceitar, como método mais correto de se obter cenários hidrológicos, a aplicação de MCGAs – Modelos de Circulação Global Atmosférica.

Porém, como a precipitação é prevista em escala maior que a de uma bacia hidrográfica, e há a necessidade de previsão climática em escalas menores, como na escala de uma bacia, uma alternativa é realizar o chamado “processo de redução de escala”, isto é, um *downscaling*. O *downscaling* consiste na transferência de informações meteorológicas para as escalas menores (GALVÃO e TRIGO, 1999). A técnica de *downscaling* ou ampliação de resolução (FUNCEME, 2001), consiste na realização do acoplamento de um MCGA e um MCAR – Modelo de Circulação Atmosférica Regional. Essa ampliação na resolução é de grande utilidade, pois atua como uma importante ferramenta, onde os resultados de previsão climática podem ser usados em modelos hidrológicos que atuam numa escala espacial menor, ajudando desta forma no processo de tomada de decisão.

Galvão e Clarke (2002) encontraram relações quase lineares para a precipitação média na escala do modelo climático global do ECMWF (malha de 275 km) e da bacia hidrográfica do rio Piancó, o que possibilita a transferência de simulações do modelo climático global através de técnicas de regressão sem perda relevante de previsibilidade.

Segundo Schaake e Liu (1989), os modelos hidrológicos vêm sendo empregados para estudar os impactos causados pelas mudanças climáticas, como é o caso do modelo MODCOU – *Modélisation Couplée* (LEDOUX et al., 1989), que associado ao modelo físico de circulação atmosférica ISBA – *Interface Soil Biosphere*, foi aplicado na bacia do rio Adour, na França. Essa aplicação mostrou que a integração do ISBA com o MODCOU apresentou uma melhora na simulação do balanço hídrico e no balanço energético do solo.

Yu et al. (2002) realizaram o acoplamento entre o modelo hidrológico HMS – *Hydrologic Model System* com o modelo climático RCM - *Regional Climate Model*, com o objetivo de simular os impactos causados pelos eventos extremos de chuva nos processos do ciclo hidrológico na bacia do rio Susquehanna, localizada nos Estados Unidos, utilizando eventos de chuvas simuladas e observadas.

Silva et al. (2002) apresentaram os resultados da avaliação das simulações (1971-2000) da precipitação sazonal (fevereiro-maio), a partir do modelo de circulação global ECHAM – *European Community – Hamburg*, aninhado ao modelo de circulação atmosférica regional RSM – *Regional Spectral Model* para o Nordeste do Brasil. As análises indicaram que o aninhamento apresentou desempenho satisfatório na precipitação média simulada do setor

norte do Nordeste, e acima dos valores do modelo de circulação global para a área leste do Nordeste.

Alves (2002) apresentou os resultados obtidos com a redução de escala dinâmica utilizada para a simulação da precipitação, do período de fevereiro a maio, no setor norte da região Nordeste, acoplando o modelo de circulação regional atmosférica MREP7 – Modelo Regional Espectral, ao modelo de circulação global atmosférica ECHAM. O modelo utilizou três conjuntos de experimentos com condições iniciais diferentes; isto é, três séries de previsão climática geradas pelo modelo regional para o período de fevereiro a maio em duas grades, uma com  $80\text{ km} \times 80\text{ km}$  e a outra com  $20\text{ km} \times 20\text{ km}$ , sendo que a grade de 20 km recebia as informações a cada seis horas os resultados de saída da grade de 80 km. Os resultados obtidos mostraram que o modelo de circulação regional atmosférica simulou satisfatoriamente a distribuição espacial da precipitação sazonal do setor norte do Nordeste na grade de  $80\text{ km} \times 80\text{ km}$ , com acertos em algumas áreas de mais de 60% de chuva do setor norte do Nordeste.

Recentemente, Souza Filho e Porto (2003) aplicaram na bacia hidrográfica do reservatório de Orós, localizado no sul do Ceará, o acoplamento entre o modelo global ECHAM – *European Community – Hamburg*, com o modelo climático regional RSM – *Regional Spectral Model*, o modelo hidrológico Smap e um modelo estatístico baseado na equação de partição chuva-vazão do método SCS – *Soil Conservation Service*. O estudo apresentou resultados satisfatórios, onde a correlação obtida com acoplamento do SCS foi de 0,83 e com o Smap de 0,81.

Hamlet (2003) investigou os efeitos potenciais do aquecimento do planeta baseado nas mudanças climáticas simuladas através de um modelo de circulação global, investigando as consequências da variação da temperatura e a influência do degelo na hidrologia do Rio Columbia, mais especificamente no reservatório local, verificando as influências das mudanças climáticas no comportamento do nível do reservatório.

Também recentemente, Medeiros (2003) estudou o comportamento da precipitação diária ocorrida no Estado da Paraíba, sobre a bacia hidrográfica do Açude Epitácio Pessoa, analisando a distribuição espacial e temporal da probabilidade de ocorrência de dias com precipitação, utilizando dados diários do período de 1963 a 1992, de vinte e sete postos pluviométricos, distribuídos espacialmente na bacia.

Nos últimos anos, com o avanço dos computadores e do desenvolvimento dos modelos regionais de circulação atmosférica, como na sua capacidade de representar as características

físicas do terreno local, tornou-se possível o acoplamento de modelos climáticos com modelos hidrológicos em tempo real com resultados animadores.

Assim, o modelo de circulação regional atmosférica RSM foi escolhido para o acoplamento entre modelos climáticos e hidrológicos uma vez que permite a operação de previsão e simulação climática diária, e seus resultados para o Nordeste do Brasil têm sido satisfatórios (SILVA et al., 2002; SOUZA FILHO e PORTO, 2003; GALVÃO et al., 2005), mostrando a importância do uso do RSM em previsões climáticas e hidrológicas em escalas menores, como a de uma bacia hidrográfica.

### **3.6 Assoreamento de Reservatórios**

Neste item é apresentada a importância de estudos de controle do assoreamento de reservatórios, bem como são mostrados alguns trabalhos desenvolvidos.

A dinâmica dos processos de erosão e assoreamento e sua influência na gestão dos recursos hídricos vêm sendo bastante estudadas. Para Ogura et al. (1997), os sedimentos produzidos pelas erosões aceleradas provocam rápido assoreamento de cursos d'água e reservatórios. O assoreamento favorece enchentes e causa a perda de capacidade de armazenamento de água em reservatórios. Sendo de extrema relevância a elaboração de estudos voltados ao mapeamento e a identificação da erosão em áreas urbanas e a consequente formulação de planos integrados de controle de erosão e de assoreamento.

No que tange às consequências dos processos de erosão e seus impactos no assoreamento de reservatórios, pode-se ressaltar que todos os reservatórios, formados através da construção de barragens, estão sujeitos ao processo de assoreamento. O acúmulo de material, isto é, de sedimentos carreados para o reservatório, reduz seu volume de água disponível, alterando a vazão regularizada e reduzindo, desta maneira, sua vida útil.

Com o objetivo de facilitar a avaliação do assoreamento em reservatórios, inúmeras técnicas vêm sendo aperfeiçoadas. Dentre elas, a ferramenta computacional ganha destaque, uma vez que vem sendo bastante utilizada em estudos de previsão e controle da produção de sedimentos. A utilização de modelos de simulação de assoreamento de reservatórios é de grande valia para a previsão de cenários futuros do grau de assoreamento do reservatório, pois servem para comparar a área do reservatório e a quantidade de água armazenada nos intervalos entre as batimetrias, aumentando o período de tempo na realização das batimetrias, minimizando os custos da manutenção da operação da barragem.

A necessidade de se estudar o assoreamento do reservatório Pirapama surgiu da constatação da alta potencialidade à erosão do ambiente físico e antrópico nos municípios localizados na bacia do mesmo nome, uma vez que se situam em regiões de relevo acidentado, condições climáticas e geológicas favoráveis ao processo de erosão, tornando-se assim numa região propícia ao assoreamento do reservatório.

Como fator agravante, o crescimento urbano desordenado, que se verifica na maior parte dos municípios, cria problemas graves de erosão, associados, sobretudo, à perda da cobertura vegetal e à execução irregular de obras, o que acaba por ocasionar ou acelerar os movimentos de massa e as voçorocas. Como consequência imediata desses problemas, são produzidas grandes quantidades de sedimentos que são carreados para os cursos d'água, provocando o seu assoreamento e causando inundações, além de deteriorar a qualidade das águas.

Os reservatórios funcionam como bacia de detenção de sedimentos. Medidas preventivas devem ser tomadas para que os sedimentos não alcancem a soleira da tomada d'água, impedindo, assim, a operação adequada do reservatório. Segundo Lopes e Santos (2002) o assoreamento de um reservatório pode ser estimado a partir de dados de transporte sólido do curso d'água, que podem ser medidos através de:

- a) campanhas de caracterização e coleta de dados sedimentométricos;
- b) medição direta das taxas de aporte sólido nos cursos d'água;
- c) métodos indiretos, utilizando-se da regionalização de dados sedimentométricos;
- d) pelo cálculo da descarga sólida por fórmulas de Einstein, Engelund e Hansen, Meyer-Peter & Müller; e
- e) através da regionalização com dados de outra bacia.

O assoreamento num reservatório pode ser ainda medido através da capacidade de retenção do reservatório. Para Santos e Lopes (2002), a eficiência na retenção de sedimentos diminui com o tempo, à medida em que a capacidade do reservatório se reduz pelo assoreamento.

Nas últimas décadas, o interesse por estudos de possíveis impactos ambientais causados pelas atividades humanas tem levado pesquisadores das mais diversas áreas do conhecimento a elaborar estudos direcionados à identificação e análise de transformações ocorridas através de mudanças no uso do solo em bacias periurbanas.

Alvim e Chaudhry (1987) desenvolveram um modelo matemático de assoreamento de reservatórios que tinha por objetivo realizar a previsão da distribuição dos depósitos de sedimentos e, consequentemente, a modificação da geometria do fundo de reservatórios ao longo do tempo. Para isto, elaboraram um modelo matemático do processo de sedimentação com a utilização de balanço de massas aplicado em um escoamento permanente bidimensional de fundo inclinado. Esta equação foi resolvida numericamente pelo método das diferenças finitas, para a obtenção dos perfis de concentração ao longo do eixo longitudinal do reservatório. A integração de tais perfis possibilitou a determinação das curvas que poderiam expressar as remoções longitudinais de sólidos em suspensão.

Como exemplo de estudos já realizados envolvendo o comportamento da produção de sedimentos em bacias hidrográficas, destacam-se os de Burch (1987) que comparou a resposta hidrológica de duas bacias, uma com cobertura vegetal e outra mantida apenas com gramíneas. Os resultados apontaram que na bacia coberta com gramíneas ocorreram altos picos de descargas de sedimentos durante os períodos chuvosos, já na bacia florestada os picos de produção de sedimentos foram muito menores.

Ramos et al. (1987) apresentaram uma metodologia para a avaliação do volume de material carreado na desembocadura dos afluentes do Alto Tietê, dispondo-se para isto de dados flúvio-sedimentométricos da respectiva bacia. Para isso, testaram algumas fórmulas, dentre as quais, a Laursen, Engelund, Garde e uma última formulação de natureza empírica, obtida a partir dos dados sedimentométricos levantados.

Cavaguti e Silva (1993) realizaram um estudo sobre o desenvolvimento urbano acelerado na cidade de Bauru, São Paulo, com o objetivo de estudar o uso e ocupação do solo e os impactos do assoreamento nos recursos hídricos superficiais. No mesmo estudo foram elaboradas alternativas de reabilitação das principais áreas degradadas.

No estudo de Carvalho e Catharino (1993) foi apresentada a previsão do assoreamento e vida útil do reservatório de Itaipu com indicação da altura de sedimento no pé da barragem para 100 anos e o tempo que o depósito alcançaria a soleira da tomada d'água. Também foi apresentada a distribuição de sedimentos em 100 anos de depósitos através de novas curvas cota-área-volume.

No que tange aos trabalhos em reservatórios localizados em bacias periurbanas, destaca-se o de Araújo (2000) que estudou a evolução do processo de assoreamento no reservatório Apipucos, inserido na área urbana da cidade do Recife. O trabalho procurou qualificar e quantificar a evolução do processo de assoreamento no reservatório, através da comparação

de levantamentos batimétricos realizados na barragem, visando o fornecimento de dados para um plano de recuperação ambiental da área de influência da barragem.

A necessidade latente de estudos hidrossedimentológicos voltados à modelagem dos processos de erosão em escala de bacia é de grande relevância para estudos de monitoramento da produção de sedimentos numa barragem, principalmente aquelas responsáveis pelo abastecimento d'água localizada nas proximidades de aglomerações urbanas.

A produção de sedimentos em determinados locais da bacia acarreta sérios problemas, tanto para o meio-ambiente, como também para os reservatórios. Dentre algumas consequências trazidas pela erosão numa bacia, destacam-se o aparecimento de ravinas e voçorocas, e a redução da produtividade agrícola. Com relação aos problemas para os reservatórios, está o transporte de poluentes químicos nos sedimentos, o assoreamento do reservatório, e a diminuição da quantidade de água armazenada.

O assoreamento em reservatórios urbanos vem sendo alvo de constantes estudos voltados para predição da produção de sedimentos através da utilização de modelos de vazão-erosão. Os modelos hidrossedimentológicos na quantificação do assoreamento em barragens, vêm sendo largamente empregados na predição do processo de erosão, no planejamento conservacionista (preventivo) no uso do solo de uma bacia hidrográfica, e no próprio comportamento do assoreamento do reservatório, independentemente da sua finalidade, seja para o abastecimento urbano, geração de energia, irrigação ou controle de cheias, todos estão sujeitos a terem sua capacidade de armazenamento reduzida, devido à erosão produzida na bacia.

Na região Nordeste, mais do que em outros locais do Brasil, o abastecimento hídrico das grandes cidades depende, em grande parte, das águas superficiais acumulada nos reservatórios. Corroborando com isso, Araújo (2003a), em pesquisa desenvolvida no Estado do Ceará, por exemplo, relata que 93% da água demandada aos usuários são de origem de barragens. Assim, considerando-se que brevemente toda a capacidade e oferta d'água nos reservatórios do Ceará estejam comprometidos, não será possível disponibilizar um aumento na oferta de água para as cidades de forma eficiente através da construção de novas barragens. Portanto, é fundamental para o desenvolvimento econômico-social dos centros urbanos a conservação da qualidade e da quantidade da água acumulada nos reservatórios para o abastecimento urbano, tornando-se relevante o estudo do comportamento do processo de assoreamento de um reservatório.

Assim, estudar o processo de assoreamento em reservatórios urbanos é de suma importância para o controle e monitoramento dos problemas ocorridos pelo processo de

erosão no abastecimento d'água das cidades tanto do ponto de vista da escassez como também do ponto de vista do controle de qualidade da água armazenada. O transporte de sedimentos afeta a qualidade da água, podendo impossibilitar seu uso para o consumo humano ou outras atividades, pois os sedimentos não são somente um dos maiores poluentes da água, mas também servem como catalisadores, carreadores e como agentes fixadores para outros agentes poluidores (ARAÚJO et al., 2003b).

Vilhena et al. (2003) apresentaram a importância da avaliação do nível de assoreamento em reservatórios, avaliando a perda da capacidade do reservatório Funil, localizado no Estado do Rio de Janeiro, após vinte e três anos de operação. Para isso, tomaram como base o projeto inicial do reservatório e o levantamento batimétrico realizado em 1992. Foi então gerado um MDT – Modelo Digital do Terreno a partir dos dois levantamentos de dados. Os resultados obtidos pelo estudo mostraram que o volume total inicial do trecho estudado em 1969 era de 82,19 milhões de m<sup>3</sup> e em 1992 passou a ser de 63,74 milhões de m<sup>3</sup>, o que corresponde a uma perda da capacidade de armazenamento de 22,93 % durante o período de análise (Tabela 3.11).

Tabela 3.11 - Volumes totais do assoreamento do reservatório Funil-RJ (VILHENA et al., 2003)

Cota (m)	Restituição (1965) Volume (km <sup>3</sup> )	Batimetria (1992) Volume (km <sup>3</sup> )	Assoreamento Volume (km <sup>3</sup> )
466,5	82,19	63,74	18,45
461,5	58,09	45,34	12,75
456,5	40,57	31,56	9,01
451,5	27,21	21,06	6,14
446,5	17,7	13,39	4,31
441,5	10,62	7,96	2,65
436,5	5,88	4,2	1,68
431,5	2,66	1,86	0,8
426,5	1,07	0,68	0,39
421,5	0,22	0,12	0,1

### 3.7 Sistema de Informações Geográficas e Modelagem Hidrológica

A modelagem hidrológica das alterações em bacias hidrográficas é um problema complexo, e uma questão que vem preocupando os responsáveis pelo gerenciamento dos recursos naturais na bacia. O desenvolvimento de modelos hidrológicos distribuídos tem

conduzido a significativas melhorias nas simulações hidrológicas, uma vez que a análise pode ser realizada do ponto de vista espacial.

A incorporação de modelos hidrológicos em um sistema de informações geográficas (SIG) auxilia na interpretação dos resultados do modelo, sendo assim uma ferramenta poderosa no cruzamento de informações espaciais (vetoriais) e tabulares de uma forma objetiva e eficiente, economizando tempo e gastos desnecessários (Figura 3.3).

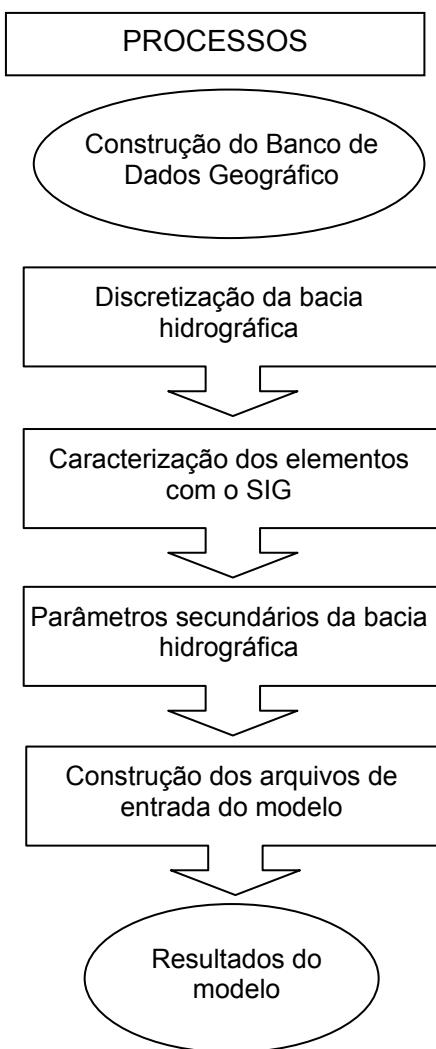


Figura 3.3 - O uso do SIG na modelagem hidrológica.

A utilização de uma ferramenta SIG constitui hoje num instrumento de grande valia para o estabelecimento de planos integrados de uso e ocupação do solo e da água, seja no meio rural ou urbano.

O SIG foi desenvolvido com o objetivo de apoiar as funções operacionais, gerenciais e, mais recentemente, de auxiliar à tomada de decisão. Nesse sentido, o acoplamento de modelos

hidrológicos e o SIG tem contribuído amplamente na predição, no planejamento e também no gerenciamento do controle da erosão, ajudando no processo de tomada de decisão (CRUZ JÚNIOR et al., 1999; RUFINO et al., 2003).

Ramirez (1994) divide as aplicações do SIG em cinco categorias principais:

- a) **Ocupação humana** – redes de infra-estrutura; planejamento e supervisão de limpeza urbana; cadastramento territorial urbano; mapeamento eleitoral; rede hospitalar; rede de ensino; controle epidemiológico; roteamento de veículos; sistema de informações turísticas; controle de tráfego aéreo; sistemas de Cartografia Náutica e serviços de atendimentos emergenciais.
- b) **Uso da Terra** – planejamento agropecuário; estocagem e escoamento da produção agrícola; classificação de solos; gerenciamento de bacias hidrográficas; planejamento de barragens; cadastramento de propriedades rurais; levantamento topográfico e planimétrico e mapeamento do uso da terra.
- c) **Uso de recursos naturais** – controle do extrativismo vegetal e mineral; classificação de poços petrolíferos; planejamento de gasodutos e oleodutos; distribuição de energia elétrica; identificação de mananciais e gerenciamento costeiro e marítimo.
- d) **Meio ambiente** – controle de queimadas; estudos de modificações climáticas; acompanhamento de emissão e ação de poluentes e gerenciamento florestal de desmatamento e reflorestamento.
- e) **Atividades econômicas** – planejamento de *marketing*; pesquisas sócio-econômicas; distribuição de produtos e serviços, e transporte de matéria-prima.

A principal vantagem na utilização do SIG reside na possibilidade de se estudar diferentes cenários com um baixo custo e de forma rápida. O acoplamento de modelos hidrológicos com o SIG não é uma integração recente e nos últimos anos tem aumentado consideravelmente.

Desde o desenvolvimento do modelo *Stanford Watershed* em 1966, inúmeros modelos hidrológicos têm sido desenvolvidos usando as bacias periurbanas como uma unidade espacial fundamental para descrever os vários componentes do ciclo hidrológico, tanto em escalas

temporal e espacial (SEMMENS et al., 2000). Nas últimas décadas, modelos de chuva-vazão-erosão têm sido utilizados cada vez mais na investigação das mudanças climáticas e nos impactos do uso e ocupação do solo sobre a produção de sedimentos e o escoamento superficial em bacias periurbanas.

Numerosos estudos têm descrito o uso de SIG na modelagem hidrológica, alguns estudos enfatizam a importância destas aplicações para o desenvolvimento de novas técnicas no planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos (MAIDMENT, 1993; SAGHAFIAN et al., 2000). Atualmente, há na literatura uma enorme variedade de aplicações utilizando a integração de modelos hidrológicos com o SIG em diferentes locais do mundo.

Pullar e Springer (2000) também realizaram aplicações de modelos hidrológicos com modelos digitais do terreno. No mesmo estudo testaram a integração do SIG e vários modelos ambientais para bacias hidrográficas. Concluíram que o acoplamento de modelos hidrológicos e o SIG é possível e traz resultados significativos, pois pode ajudar nos processos de apoio à decisão.

Jain e Dolezal (2000) aplicaram o modelo EPIC - *Environmental Productivity Impact Calculator*, um modelo semi-empírico complexo que usa parâmetros distribuídos num SIG, para estimar os processos de erosão em dezoito sub-bacias da bacia do rio Cernici, inserida na região da Boêmia Central, República Tcheca. Alguns dados de entrada para o EPIC, como áreas, elevações, comprimentos e declividades são preparados usando um sistema de informações geográficas, os demais são preparados fora do ambiente SIG e importados para a realização da simulação hidrológica.

Imagens de sensores remotos e técnicas de geoprocessamento também vêm sendo empregadas freqüentemente em estudos de modelagem hidrológica, e em estudos geoambientais. Shrimali et al. (2001), por exemplo, realizaram o diagnóstico da susceptibilidade da erosão do solo na bacia do Lago Sukhna, nordeste da Índia, usando imagens de satélite e técnicas de geoprocessamento para o tratamento dos resultados.

Lacroix et al. (2002) apresentaram a comparação dos resultados obtidos da modelagem hidrológica para a bacia do rio Creek, localizada no Estado de Yukon, Canadá, utilizando o modelo hidrológico semi-distribuído denominado de SLURP – *Semi-distributed Land Use-based Runoff Processes* através de técnicas de análise digital do terreno.

Kalin et al. (2003) estimaram a vazão e a produção de sedimentos através do acoplamento entre o modelo Kineros2 – *Kinematic Runoff Erosion Model* e o Arview em duas pequenas bacias experimentais da USDA – Departamento de Agricultura dos Estados Unidos,

através do uso de técnicas de geoprocessamento como sobreposição de mapas físicos da bacia para a obtenção de sua rede de fluxo, delineamento da bacia e declividade.

### **3.8 Considerações Finais**

Com o crescimento populacional das grandes cidades brasileiras nas últimas décadas, os sistemas de abastecimento têm se mostrado sobrecarregados em períodos mais longos de estiagem, principalmente aqueles das regiões metropolitanas do Nordeste, chamando a atenção dos responsáveis pelo gerenciamento dos recursos hídricos para o desenvolvimento de estudos de previsão hidrológica.

A RMR, por exemplo, sofreu entre 1997 e 1999 um de seus piores períodos de estiagem, chegando a sofrer um racionamento de água em alguns locais de um dia com água e nove sem água, por isso, a importância na realização de estudos de modelagem em bacias periurbanas, como é o caso da bacia do rio Pirapama.

Recentemente, com o desenvolvimento de “super-computadores”, tornou-se possível a realização de previsões climáticas através de modelos de circulação atmosférica para escalas menores, como a de uma bacia hidrográfica utilizando a técnica de *downscaling*. Essa evolução tornou possível o acoplamento entre os modelos de previsão climática e modelos hidrológicos, possibilitando a previsão da produção de sedimentos, do assoreamento de um reservatório, e de vazões a partir de dados climáticos previstos pelos modelos de circulação atmosférica.

Com o desenvolvimento do SIG também tornou-se possível retratar espacialmente as informações obtidas através do acoplamento entre modelos de previsão climática e hidrológicos de maneira rápida e sem grandes custos de operação. Assim, o desenvolvimento de um sistema integrado de previsão de chuva-vazão-erosão acoplado a um SIG é extremamente útil e pode ser usado por um comitê de bacia hidrográfica no gerenciamento dos recursos hídricos.

## 4 METODOLOGIA: MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização deste trabalho foram utilizados vários procedimentos metodológicos. Para tanto, diversas etapas tiveram que ser seguidas, como:

- a. Escolha dos modelos hidrológicos utilizados na pesquisa:** os modelos Kineros2 e Açumod, foram utilizados para a elaboração da modelagem hidrológica da bacia Pirapama.
- b. Seleção do modelo de previsão climática e de análise matemática:** para a realização do acoplamento dos modelos hidrológicos com o de previsão climática, foi selecionado o modelo de previsão atmosférica regional RSM, e o programa de análise e tratamento matemático utilizado na extração das séries simuladas através do modelo climático foi o Grads, ambos descritos no Capítulo 4.
- c. Coleta de dados observados de chuva e vazão:** foram coletados dados observados de precipitação e vazão para postos inseridos na bacia e em seu entorno junto à ANA – Agência Nacional de Águas e ao LAMEPE – Laboratório de Meteorologia do Estado de Pernambuco.
- d. Obtenção de mapas topográfico, de geologia, de solos e de vegetação da bacia:** foram obtidos mapas temáticos na escala de 1:100.000 contendo a geologia (Figura 4.1), os solos (Figura 4.2), a vegetação, a hidrografia e o uso e ocupação do solo da bacia. A partir das

cartas topográficas da Sudene de Vitória de Santo Antão e Recife, ambas na escala de 1:100.000, foram digitalizadas todas curvas de nível (com eqüidistância de 40 m), para a elaboração do mapa altimétrico, e o Modelo Numérico do Terreno – MNT da bacia hidrográfica do rio Pirapama, para facilitar na discretização da bacia.

- e. **Discretização da bacia em planos, células e canais através da sobreposição dos mapas físicos para a modelagem dos fenômenos hidrológicos:** no que se refere a discretização da bacia foi elaborada a partir da divisão em planos irregulares e canais no modelo Kineros2, e em uma malha de células quadradas no modelo Açumod, obtidos de acordo com a topografia, o tipo de solo e os fluxos de drenagem.

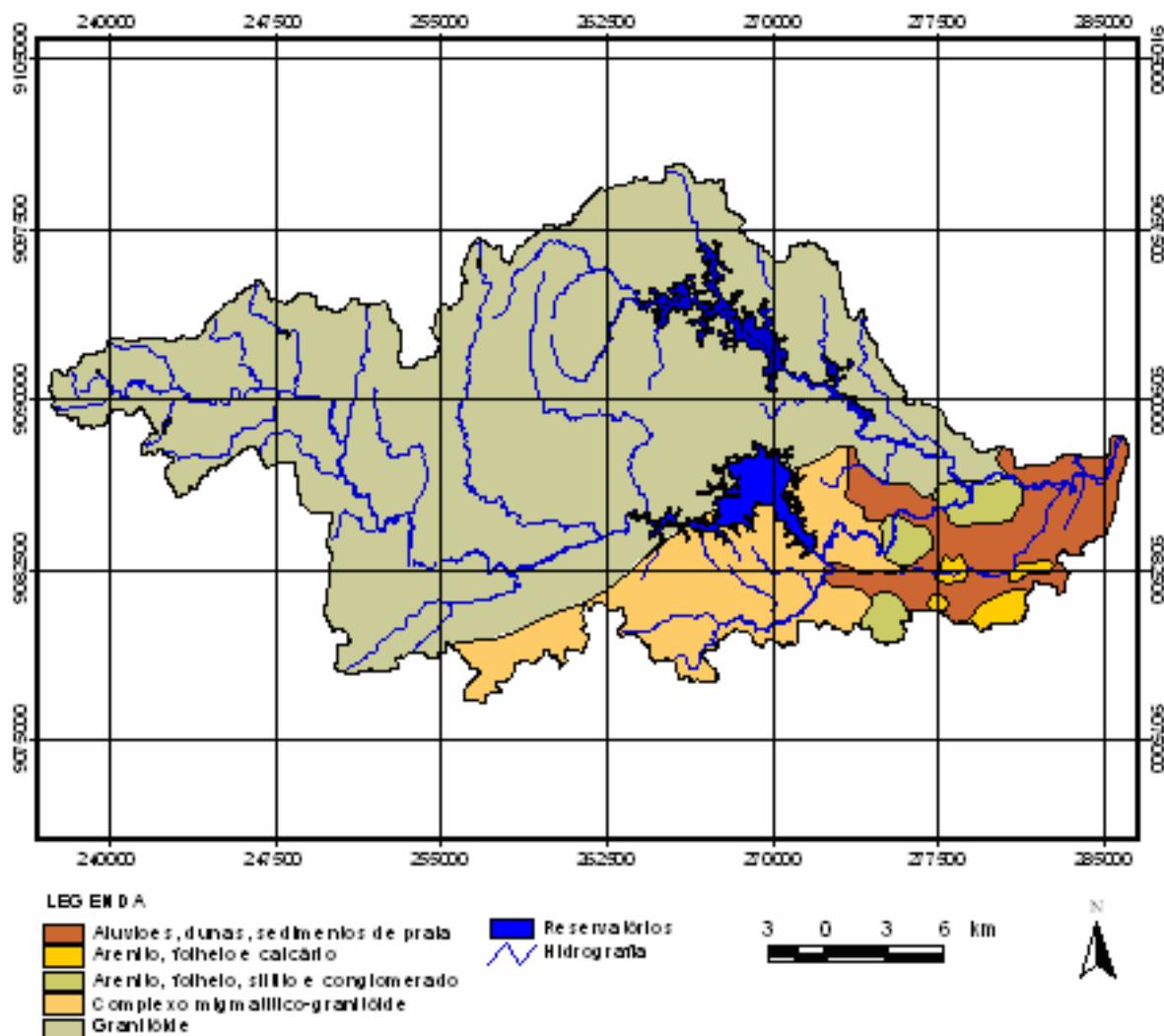


Figura 4.1 - Geologia da bacia do rio Pirapama.

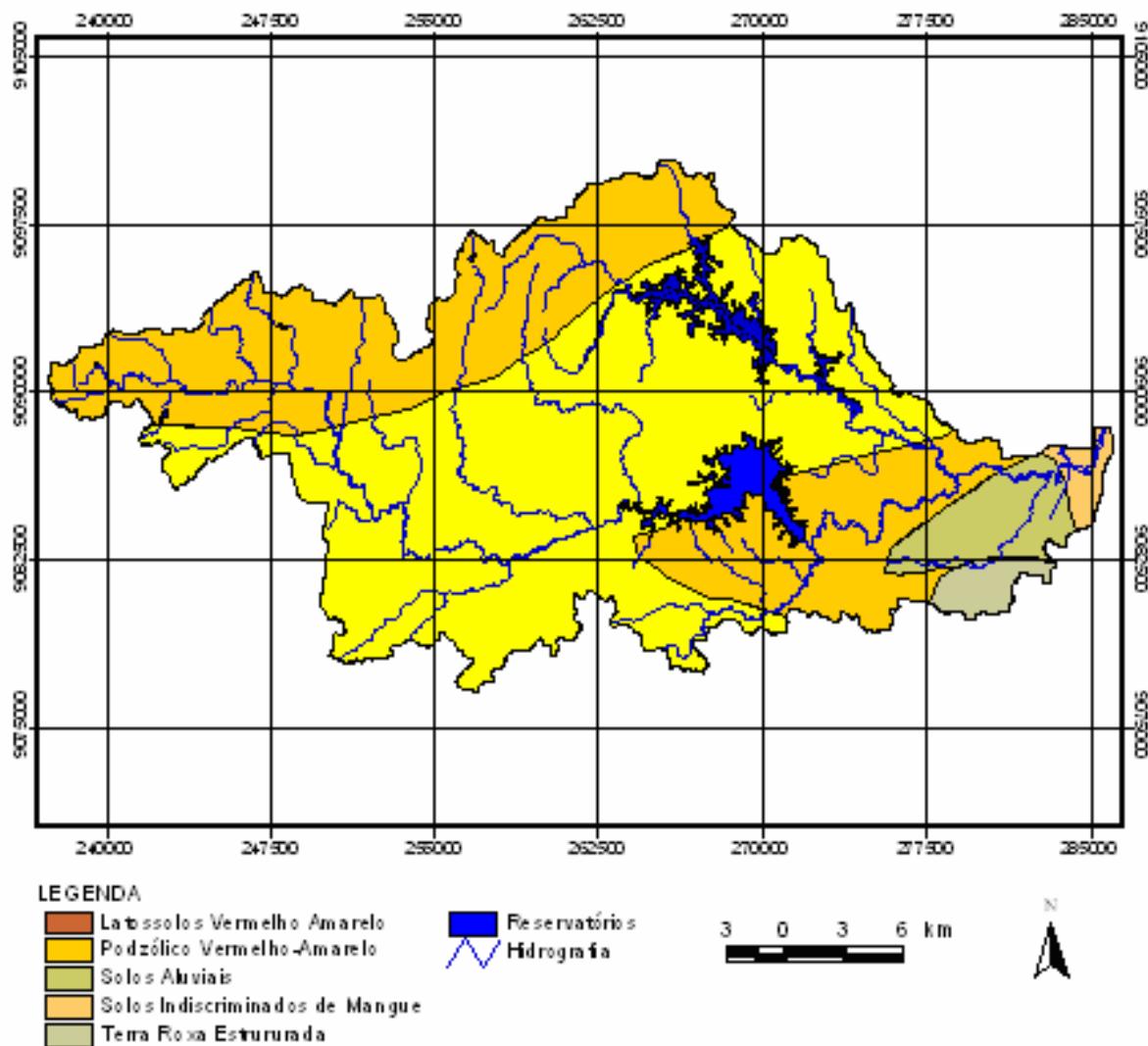


Figura 4.2 - Tipos de solos da bacia do rio Pirapama.

- f. **Simulações hidrológicas na bacia e no reservatório Pirapama com dados observados:** a partir da discretização da bacia, foi possível simular o comportamento hidrológico da vazão através dos modelos Açumod e Kineros2, da erosão na bacia, e do assoreamento potencial do reservatório Pirapama no modelo Kineros2.
- g. **Acoplamento dos modelos hidrológicos em Sistema de Informações Geográficas (SIG):** após a modelagem da vazão e da erosão pelo modelo Kineros2, os resultados foram acoplados num SIG.
- h. **Integração entre modelos hidrológicos e de previsão climática:** este estudo adotou o RSM – *Regional Spectral Model*, como o modelo de circulação atmosférica regional

responsável pelas previsões climáticas. O modelo RSM foi aninhado ao modelo de circulação atmosférica global ECHAM – *European Community – Hamburg*, e integrado para um período de 30 anos, para os seis primeiros meses de 1971 a 2000. Esse aninhamento foi realizado pela FUNCEME – Fundação Cearense de Meteorologia, que disponibilizou as séries pluviométricas previstas pelos modelos de previsão climática para o Projeto PRECLIHNE – Previsão Climática e Hidrológica no Nordeste do Brasil. Foram feitas previsões climáticas de 1987 a 2000 por ser o maior período de dados observados de pluviometria e fluviometria nos postos da bacia. Os dados previstos pelos modelos climáticos, foram extraídos num ponto de grade referente a localização dos postos fluviométricos Pirapama, Engenho Cachoeirinha e Pombos, e serviram de entrada nos modelos hidrológicos Açumod e Kineros2.

- i. **Previsões hidrossedimentológicas para a bacia do rio Pirapama:** a partir das conversões das previsões climáticas em vazão e erosão pelos modelos hidrológicos, foram realizadas simulações hidrossedimentológicas para a bacia do rio Pirapama no período compreendido entre 1987 e 2000.

#### 4.1 Modelos Utilizados na Pesquisa

Os seguintes programas foram empregados neste trabalho: o modelo de circulação climática global ECHAM (ROECKNER et al., 1996), o modelo de circulação climática regional RSM (JUANG e KANAMITSU, 1994), o programa matemático Grads (DOTY et al., 1995), o modelo hidrológico Açumod (SILANS et al., 2000) e o modelo hidrossedimentológico Kineros2 (WOOLHISER, 1990). Com relação ao método de análise empregado no estudo, foi utilizado o método descritivo-analítico que permitiu a explanação e a análise dos resultados. Em seguida, são mostradas as descrições mais detalhadas dos materiais usados no trabalho.

Os dados de fluviometria foram coletados junto à base de dados da ANA – Agência Nacional de Águas, e os dados de pluviometria foram cedidos pelo LAMEPE – Laboratório de Meteorologia de Pernambuco e da ANA. No Capítulo 2 encontra-se uma descrição mais detalhada dos dados utilizados de chuva e vazão.

## 4.2 Definição do Modelo Kineros2

Desde 1970, a aproximação cinemática tem sido bastante usada para simular o movimento do excesso de chuva sobre a superfície. Um dos estudos precursores foi elaborado por Rovey et al. (1977), que através de pequenas redes arbitrárias de planos e canais aplicaram um modelo chamado *Kingen*, o qual usava um outro modelo de infiltração para simular a vazão, e era usado também para calcular a erosão. A partir dessa primeira tentativa, esse modelo foi sendo modificado para poder simular a erosão, o transporte de sedimentos e a infiltração, sendo denominado de Kineros2. Segundo Santos et al., (2001b) e Lopes (2003), a nova versão do modelo Kineros2 inclui características, tais como: (a) o algoritmo de infiltração abrange o perfil do solo com duas camadas e incorpora um novo método baseado nas características físicas do solo, com a finalidade de redistribuir a água no solo durante os períodos sem chuva; e (b) o solo e os sedimentos são caracterizados por uma distribuição em até cinco classes de tamanho de sedimento, o que o torna ideal para a aplicação ao estudo de previsão hidrossedimentológica na bacia do rio Pirapama, já que com isto poder-se-ia simular eventos para períodos contínuos, incluindo os períodos de estiagem.

A representação do solo em duas camadas também se adequa às condições da bacia uma vez que o modelo representa satisfatoriamente as condições das camadas inferiores do solo, além de permitir o cálculo da produção de sedimentos através da distribuição em classes de sedimentos, ajudando na identificação das áreas que mais contribuem para o processo de erosão.

O Kineros2 é um modelo hidrológico de chuva-vazão-erosão do tipo cinemático, distribuído de base física, orientado a evento, que usa uma rede de planos e canais que representam os cursos d'água na bacia, o qual serve para simular os processos de interceptação, infiltração, vazão e erosão de pequenas bacias rurais e urbanas. As equações diferenciais descrevem o escoamento, o transporte de sedimentos e a erosão nestes planos e canais e são resolvidas pela técnica de diferenças finitas.

### 4.2.1 O modelo de infiltração do solo

A formulação do modelo permite uma aproximação física para a redistribuição da água no solo, incluindo a capacidade de recuperação de infiltração durante as estiagens, determinando o percentual de infiltração depois desta estiagem. O modelo de infiltração

descreve a capacidade de infiltração  $f_c$  como uma função da profundidade infiltrada  $I$  e necessita de quatro parâmetros básicos para descrever as propriedades de infiltração, que são o de condutividade hidráulica efetiva saturada do solo  $K_s$  (m/s), a capilaridade integral do solo  $G$  (cm), e o índice de distribuição dos tamanhos dos poros  $\lambda$ . Também, existe uma variável relacionada ao evento que é a saturação relativa inicial da camada superior do solo  $S_i$ , igual a  $\theta_i/\phi$ , no qual  $\theta_i$  é a umidade inicial do solo e  $\phi$  a porosidade. O modelo geral para a infiltrabilidade  $f_c$  (m/s) é dado, como uma função de profundidade infiltrada  $I$  (m), por:

$$f_c = K_s \left[ 1 + \frac{\alpha}{e^{\alpha I/B} - 1} \right] \quad (3)$$

onde  $B$  é  $(G + h)(\theta_s - \theta_i)$ , combinando os efeitos da franja capilar  $G$ , altura do escoamento  $h$  (cm), e a capacidade de armazenamento unitária  $\Delta\theta = (\theta_s - \theta_i)$ , no qual  $\theta_s$  é a umidade de saturação do solo. O parâmetro  $\alpha$  representa o tipo de solo; isto é, próximo de 0 para areia, neste caso a equação (3) se aproxima da equação de Green-Ampt; e  $\alpha$  é próximo de 1 para um solo franco misto, em tal caso a equação (3) representa a equação de infiltração de Smith-Parlange. Como dito, neste modelo existe uma redistribuição de água no solo, pois considera-se que existindo uma estiagem prolongada durante o evento de chuva o solo deve secar. O método de redistribuição/reinfiltração usado no modelo é descrito em Smith et al. (1993), e também em Corradini et al. (1994).

#### 4.2.2 Escoamento superficial no plano

A modelagem do escoamento superficial na bacia é resolvida pelo modelo Kineros2 baseado na resolução de equações diferenciais parciais, as quais descrevem o fluxo e a profundidade do nível da água como sendo funções do tempo e do espaço, sendo o escoamento superficial, o resultado da interação da precipitação com a bacia hidrográfica. Estas equações são formadas pela equação de continuidade, sob a seguinte forma (SANTOS et al., 2003; LOPES, 2003):

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q \quad (4)$$

onde  $Q$  é a vazão ( $\text{m}^3/\text{s}$ ),  $A$  é a área da seção transversal do canal ( $\text{m}^2$ ),  $q$  é a entrada lateral do escoamento ( $\text{m}^2/\text{s}$ ),  $x$  é a coordenada espacial (m) e  $t$  é a coordenada temporal (s). A equação da quantidade de movimento apresenta a seguinte forma:

$$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{Q^2}{A} \right) + g \frac{\partial y}{\partial x} - g(S_0 - S_f) = q \quad (5)$$

onde  $y$  é a profundidade do escoamento (m),  $g$  é a aceleração da gravidade,  $S_0$  é a declividade do fundo do canal e  $S_f$  é a declividade da linha de energia, e as outras variáveis já foram mencionadas anteriormente.

#### 4.2.3 Escoamento superficial no canal

O escoamento superficial no canal pode ser observado como um processo de escoamento uni-dimensional no qual o fluxo é relacionado a uma área de armazenamento unitária por uma relação exponencial simples:

$$Q = ah^m \quad (6)$$

onde  $Q$  no canal é a descarga por unidade de comprimento ( $\text{m}^2/\text{s}$ ), e  $h$  é o armazenamento de água por unidade de área (m). Os parâmetros  $a$  e  $m$  são relacionados à declividade, à rugosidade e ao regime do escoamento, e são dados por  $a = S^{1/2}/n$  e  $m = 5/3$  onde  $S$  é a declividade, e  $n$  é o coeficiente de rugosidade de *Manning*. A equação de continuidade para um plano é dada por:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q(x, t) \quad (7)$$

onde  $t$  é o tempo (s),  $x$  é a distância na direção da declividade (m), e  $q(x, t)$  é a taxa de vazão afluente lateral ( $\text{m}/\text{s}$ ). Para o escoamento superficial, a equação resultante é resolvida usando um método das diferenças finitas de quatro pontos. A equação de continuidade para um canal

com vazão afluente lateral é dada por:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_c(x, t) \quad (8)$$

sendo  $A$  a área da seção transversal ( $\text{m}^2$ ),  $Q$  é descarga no canal ( $\text{m}^3/\text{s}$ ), e  $q_c(x, t)$  é a rede de vazão afluente por comprimento de canal ( $\text{m}^2/\text{s}$ ). A aproximação cinemática é incorporada na relação entre a descarga do canal e a área da seção transversal tal que:

$$Q = aR^{m-1}A \quad (9)$$

onde  $R$  é o raio hidráulico (m). As equações cinemáticas para canais são resolvidas por uma técnica implícita de quatro pontos similar àquela para escoamento superficial.

#### 4.2.4 Erosão nos planos e canais

A equação geral usada para descrever a dinâmica dos sedimentos em qualquer ponto ao longo do escoamento superficial é uma equação de balanço de massa similar ao escoamento cinemático da água:

$$\frac{\partial(AC_s)}{\partial t} + \frac{\partial(QC_s)}{\partial x} - e(x, t) = q_s(x, t) \quad (10)$$

onde  $C_s$  é a concentração de sedimentos ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ ),  $Q$  é a taxa vazão ( $\text{m}^3/\text{s}$ ),  $A$  é a área da seção transversal do escoamento ( $\text{m}^2$ ),  $e$  é a taxa de erosão do solo do leito ( $\text{m}^2/\text{s}$ ),  $q_s$  é a taxa de entrada lateral de sedimentos nos canais ( $\text{m}^2/\text{s}$ ). Para os planos,  $e$  é assumida como sendo compostas de dois principais componentes, isto é, produção de solo erodido pelos impactos das gotas de chuva sobre o solo descoberto, e erosão hidráulica (ou deposição) devido à interação entre a força de cisalhamento da água no solo solto do leito e a tendência das partículas do solo se sedimentarem sob a força da gravidade. A taxa total de erosão é um somatório da taxa de erosão pelo impacto das gotas de chuva  $e_s$  e a taxa de erosão hidráulica  $e_h$ :

$$e = e_s + e_h \quad (11)$$

A taxa de erosão pelo impacto da chuva é estimada como:

$$e_s = c_f e^{-c_h h} r^2 \quad (12)$$

na qual  $r$  é a chuva efetiva (m/s),  $c_f$  é uma constante relacionada ao solo e às propriedades da superfície, e  $e^{-c_h h}$  é um fator de redução representando a redução na erosão causada pelo aumento da altura da água. O parâmetro  $c_h$  representa a efetividade do molhamento da água superficial, assumido como sendo igual a 364,0. A taxa de erosão hidráulica ( $e_h$ ) é estimada como sendo linearmente dependente da diferença entre a concentração de equilíbrio e a concentração corrente de sedimento e é dada por:

$$e_h = c_g (C_m - C_s) A \quad (13)$$

onde  $C_m$  é a concentração na capacidade de transporte em equilíbrio,  $C_s = C_s(x, t)$  é a concentração de sedimento local corrente, e  $c_g$  é um coeficiente de taxa de transferência ( $s^{-1}$ ), que é computado por:

$$c_g = C_o \frac{v_s}{h} \quad \text{se } C_s \leq C_m \text{ (erosão)} \quad \text{ou} \quad c_g = \frac{v_s}{h} \quad \text{se } C_s > C_m \text{ (deposição)} \quad (14)$$

onde  $C_o$  é o coeficiente de coesão do solo, e  $v_s$  é a velocidade da queda da partícula (m/s). O modelo usa a relação da capacidade de transporte de Engelund e Hansen (1967), e a velocidade da partícula é calculada pela seguinte equação:

$$v_s^2 = \frac{4}{3} \frac{g(\rho_s - 1)d}{C_D} \quad (15)$$

no qual  $g$  é a aceleração gravitacional ( $m/s^2$ ),  $\rho_s$  é a densidade relativa do sedimento, igual a 2,65,  $d$  é o diâmetro do sedimento (m), e  $C_D$  é coeficiente de resistência da partícula. O coeficiente de resistência da partícula é uma função do número de Reynolds:

$$C_D = \frac{24}{R_n} + \frac{3}{\sqrt{R_n}} + 0.34 \quad (16)$$

sendo  $R_n$  o número de Reynolds, dado por  $R_n = v_s d / \nu$ , no qual  $\nu$  é a viscosidade cinemática da água ( $\text{m}^2/\text{s}$ ). As equações citadas de erosão são aplicadas para cada um dos cinco tamanhos de classes das partículas, que são usadas para descrever um solo quando existe uma variação do tamanho das partículas. As equações (10-16) são resolvidas numericamente para cada espaço de tempo usado nas equações de escoamento, e para cada classe de tamanho de partícula.

### 4.3 Dados de Entrada do Modelo Kineros2

#### 4.3.1 Dados de entrada

O modelo Kineros2 necessita de algumas informações de entrada para o arquivo de precipitação, como mostrado abaixo e na Figura 4.3:

- a) Intensidade da precipitação em mm/h ou altura de chuva – *Depth*;
- b) Tempo da precipitação em minutos – *Time*; e
- c) Quantidade de eventos de chuva – *N*.

```

BEGIN RG01
  X = 249157.7556, Y = 9090049.9833
  TIME      DEPTH
  ! (min)    (mm)
  0.0        0.00
  15.0       1.00
  28.0       1.50
  43.0       2.60
  57.0       3.60
  72.0       5.90
END

```

Figura 4.3 - Exemplo de um arquivo de entrada de chuva do modelo Kineros2.

### 4.4 Parâmetros do Modelo Kineros2

Os modelos hidrológicos possuem uma estrutura definida e alguns parâmetros que controlam sua operação. Tais parâmetros são definidos para determinada bacia, com o objetivo de particularizar o modelo para ela, para que ele possa reproduzir de forma satisfatória o comportamento hidrológico da bacia (GALVÃO, 1990).

Os parâmetros no modelo Kineros2 se dividem em dois tipos: o primeiro são aqueles ditos globais, que se referem às características físicas da bacia como um todo, ou seja, são homogêneos para toda a bacia, e o segundo tipo são os parâmetros distribuídos nos planos e nos canais.

#### 4.4.1 Parâmetros globais do modelo Kineros2

Os parâmetros globais (Figura 4.4) do modelo Kineros2 são:

- a) *Units* - sistema de unidades utilizado para todos os parâmetros (sistema métrico decimal ou inglês);
- b) *Clen* - comprimento característico, cujo valor é dado pelo comprimento do maior canal ou da maior cascata de planos;
- c) *Temperature* - temperatura em graus *Celsius* ou *Fahrenheit*;
- d) *Diameters* - diâmetros representativos das partículas de solo, em milímetros ou polegadas.

O limite máximo é de cinco classes, por exemplo, 0,5mm, 0,25mm, 0,05mm, e 0,005mm; e

- e) *Densities* - valores das massas específicas dos diâmetros das classes determinadas no parâmetro *Diameters*.

```

BEGIN GLOBAL
CLEN = 13000, UNITS = METRIC
DIAMS = .005, .05, .25, 0.50 ! mm
DENSITY = 2.65, 2.60, 2.60, 2.60 ! g/cc
TEMP = 26 ! deg C
END GLOBAL

BEGIN PLANE
ID = 1, LEN = 503.12, WID = 1229.5, SL = .159, MANNING = 40.0
SPACING = 0.1, In = .99, Canopy = 1, SAT = .7
KS    G    DIST  POR   ROCK
3.0   20   0.32  .30   0.2  ! upper layer
0.7   12   0.16  .20   0.2  ! lower layer
FRACT = 0.3, 0.2, 0.3, 0.2,  SPLASH = 50, CO = 0.5
END PLANE

BEGIN CHANNEL
ID = 3, LAT = 1.2, LEN = 1229.5, Type = S, DEPTH = 2.0
WIDTH  SLOPE  MANNING  SS1  SS2
20.3   .065   0.009   .50   .80
CO = .4, FRA = 0.3, 0.3, 0.4
END CHANNEL

```

Figura 4.4 - Exemplo de um arquivo de entrada dos parâmetros do modelo Kineros2.

#### 4.4.2 Parâmetros dos planos do modelo Kineros2

Os parâmetros de calibragem dos planos do modelo Kineros2 (Figura 4.2) estão listados abaixo:

- a) *Identifier* - número de identificação do plano;
- b) *Upstream* - número de identificação do plano a montante (se houver);
- c) *Length* - comprimento, em metros ou pés;
- d) *Width* - largura, em metros ou pés;
- e) *Slope* - declividade do plano;
- f) *Manning* - coeficiente de rugosidade de *Manning*;
- g) *Chezy* - coeficiente de *Chezy*;
- h) *Relief* - altura média do relevo da microtopografia, em milímetros ou polegadas;
- i) *Spacing* - distância média do relevo da microtopografia, em metros ou pés;
- j) *Interception* - interceptação vegetal, em milímetros ou polegadas;
- k) *Canopy cover* - fração da superfície ocupada por vegetação;
- l) *Saturation* - saturação inicial relativa do solo, razão entre a umidade inicial e a porosidade do solo;
- m)  $C_v$  - coeficiente de variação da condutividade hidráulica saturada efetiva;
- n)  $K_s$  - condutividade hidráulica saturada efetiva, medida em mm/h ou polegadas/h;
- o)  $G$  - valor efetivo do potencial de capilaridade do solo, em mm ou polegadas;
- p) *Distribution* - índice de distribuição do tamanho dos poros;
- q) *Porosity* - porosidade do solo;
- r) *Rock* - fração volumétrica de rochas;
- s) *Splash* - parâmetro que representa a erosão causada pelo impacto das gotas de chuva no solo;
- t) *Cohesion* - coeficiente de coesão do solo; e
- u) *Fractions* - fração de cada classe de diâmetros representativos do solo.

#### 4.4.3 Parâmetros dos canais do modelo Kineros2

Os parâmetros de calibragem dos canais do modelo Kineros2 (Figura 4.2) estão listados abaixo:

- a) *Upstream* - número de identificação do elemento (plano ou canal) à montante;
- b) *Lateral* - número de identificação dos planos que contribuem lateralmente para o canal;
- c) *Length* - comprimento, em metros ou pés;
- d) *Width* - largura, em metros ou pés;
- e) *Slope* - declividade do canal;
- f) *Manning* - coeficiente de rugosidade de *Manning*;
- g) *Chezy* - coeficiente de *Chezy*;
- h) *SSI, SS2* - declividades laterais do canal;
- i) *Saturation* - saturação inicial relativa do solo, razão entre a umidade inicial e a porosidade do solo;
- j)  $C_v$  - coeficiente de variação da condutividade hidráulica saturada efetiva;
- k)  $K_s$  - condutividade hidráulica saturada efetiva, medida em mm/h ou polegadas/h;
- l)  $G$  - valor efetivo do potencial de capilaridade do solo, em mm ou polegadas;
- m) *Distribution* - índice de distribuição do tamanho dos poros;
- n) *Porosity* - porosidade do solo;
- o) *Rock* - fração volumétrica de rocha;
- p) *Cohesion* - coeficiente de coesão do solo; e
- q) *Fractions* - fração de cada classe de diâmetros representativos do solo.

#### 4.4.4 Estimativa dos parâmetros do modelo Kineros2

Os parâmetros globais, dos planos e dos canais listados anteriormente podem ser agrupados em três categorias:

- a) Parâmetros obtidos através de ensaios na área de estudo ou de acordo com as características geométricas dos elementos, são eles: *Clen, Diameters, Densities, Upstream, Length, Width, Slope, Canopy cover,  $C_v$ , G, Porosity* e *Distribution*.
- b) Parâmetros que podem ser obtidos através de literatura, com base em trabalhos efetuados na bacia em estudo ou em pesquisas similares: *Manning, Chezy, Relief e Spacing*.
- c) Parâmetros que necessitam de calibração: *Splash* que é o parâmetro  $c_f$  da equação (12), *Cohesion* que é o parâmetro  $C_o$  da equação (14), e *Saturation (Si)*, condutividade hidráulica saturada do solo  $K_s$  e capilaridade integral do solo, medidos pela equação (3).

## 4.5 Descrição do Modelo Açumod

O Açumod é um modelo hidrológico distribuído contínuo que, efetua o balanço hídrico dos açudes implantados na rede de drenagem da bacia hidrográfica, considerando as respectivas regras de operação dos açudes. O modelo é do tipo determinístico distribuído linear, e é uma adaptação do modelo de Simulação a Malhas Quadradas Embutidas – SIMMQE, desenvolvido pela *Institut français de la recherche scientifique pour le développement en coopération* – ORSTOM, utilizado pelo Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica – DNAEE, para a bacia hidrográfica do Rio Parnaíba, localizada no Estado de São Paulo.

O Açumod preserva a mesma estrutura do modelo SIMMQE, tendo simplificado e adaptado alguns comandos de leituras dos arquivos de entrada e saída. Algumas modificações foram introduzidas em seus algoritmos para adaptá-lo a modelagem de chuva-vazão em regiões do Nordeste do Brasil como testado nos estudos de Silans et al. (2000), Paiva (2000), Silva Júnior et al. (2002) e Silva et al. (2004).

### 4.5.1 Dados de entrada do modelo Açumod

Os dados de entrada do modelo hidrológico Açumod, são os dados diários de precipitação de postos localizados dentro e próximos à bacia, as médias mensais de vazões dos postos inseridos na bacia, e os dados mensais de evapotranspiração potencial. Desta forma, é criado pelo próprio modelo um banco de dados com as informações anteriormente citadas.

Carrega-se então o modelo com informações sobre o código do posto, suas coordenadas  $X$  e  $Y$  em quilômetros, sua altitude, e o nome do posto pluviométrico, como pode ser visualizado na Tabela 4.1, resultando no polígono de Thiessen gerado pelo modelo, representando a influência de cada posto em cada quadrícula (Figura 4.5). Os postos pluviométricos utilizados na modelagem da vazão estão indicados e foram escolhidos por possuírem a maior série de dados de pluviometria na bacia.

Tabela 4.1 - Descrição dos postos pluviométricos utilizados pelo modelo Açumod

Código do posto	Altitude (m)	Y (km)	X (km)	Nome do posto
0835137	290	9.098,34	237,75	Pombos
0835068	360	9.090,85	249,13	Engenho Cachoeirinha
0835138	30	9.084,31	272,67	Pirapama

#### 4.5.2 Discretização da bacia no modelo Acumod

Inicialmente torna-se necessária a caracterização fisiográfica da bacia, através da eliminação de quadrículas para uma melhor adequação à forma irregular da bacia ou ainda divisão para detalhar melhor as informações da bacia, como exemplo da localização de um elemento da estrutura hidráulica da bacia. A quadrícula “mãe” de lado  $a$ , só poderá ser subdividida em quadrículas menores de lado  $a/2$ ,  $a/4$ ,  $a/8$ , conforme mostrado na Figura 4.6. Deve-se ainda respeitar uma regra que relaciona quadrículas vizinhas no seguinte aspecto: Uma quadrícula de lado  $a/2^n$  ( $n = 0, 1, 2$  ou  $3$ ) só pode ter como quadrícula vizinha uma quadrícula de mesmo tamanho,  $a/2^n$ , ou de tamanho imediatamente inferior,  $a/2^{n+1}$ , ou imediatamente superior  $a/2^{n-1}$ .

Em cada célula, os parâmetros do ciclo hidrológico do modelo são descritos, bem como os atributos para representação do sentido da drenagem e a possível existência de elementos da arquitetura hidráulica da bacia hidrográfica.

Algumas características físicas da bacia são então atribuídas para cada célula, tais como: (a) altitudes médias para cada célula, obtidas através do mapa topográfico da bacia; e (b) direção do fluxo de drenagem (NW, NE, EN, ES, SE, SW, WS ou WN), como mostrado na Figura 4.7. Para a quadrícula que corresponde ao exutório da bacia é atribuído o sentido genérico “Ex” de exutório.

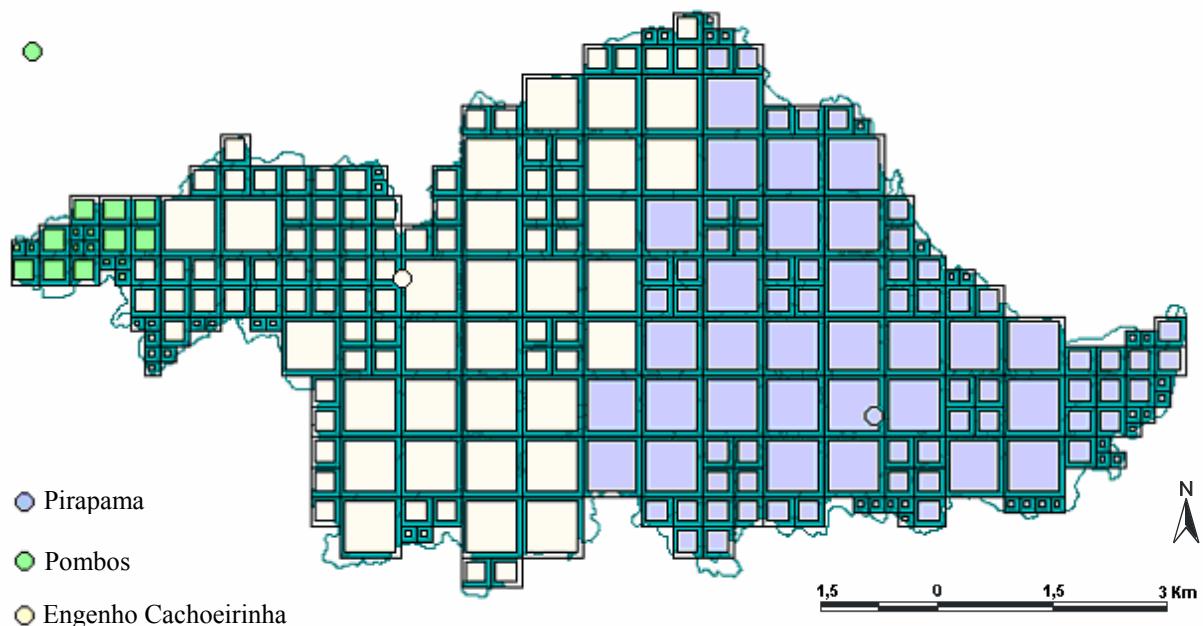


Figura 4.5- Áreas de influência para cada posto pluviométrico calculada pelo método de Thiessen.

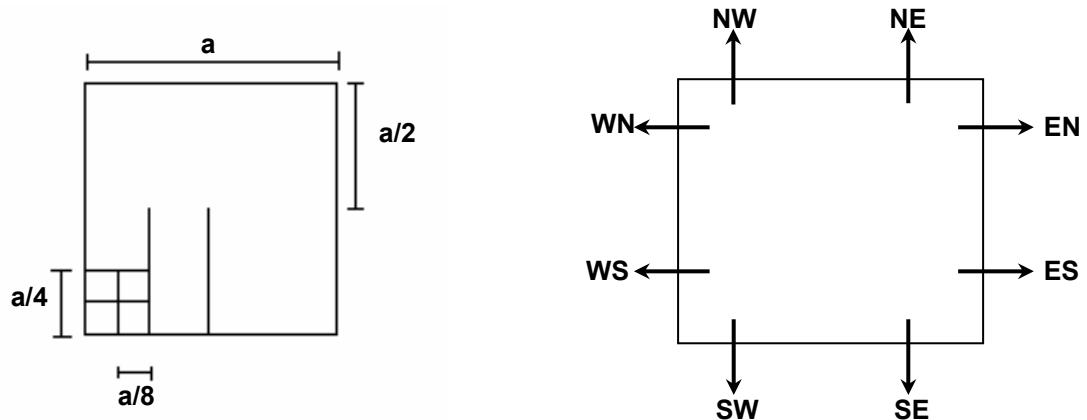


Figura 4.6 - Modelo de discretização das células. Figura 4.7 - Direção da drenagem nas células.

#### 4.5.3 Zonas hidrologicamente homogêneas

As zonas hidrológicas homogêneas são zonas que possuem a mesma produção de água para uma mesma precipitação e umidade inicial do solo. Para a discretização dessas zonas são utilizadas técnicas de cartografia digital, como a superposição de mapas digitais de solo, de vegetação, de geologia e de topografia, que são sobrepostos, definindo-se assim, sobre a bacia hidrográfica as zonas com a mesma resposta hidrológica (Figura 4.8).

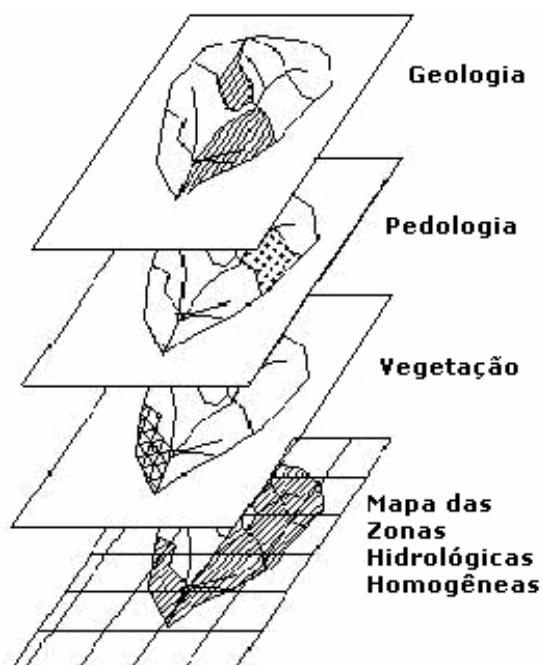


Figura 4.8 - Esquema das zonas hidrológicas homogêneas.

Foram propostas cinco zonas hidrologicamente homogêneas, conforme publicado em Silva et al. (2004) para a bacia do rio Pirapama (Figura 4.9): (a) *Argilosa*: esta área identificada na bacia é constituída por solos que apresentam baixas taxas de infiltração e são encontrados na parte a montante da bacia; (b) *Saturada*: esta zona hidrológica apresenta solos denominados de indiscriminados, constituídos principalmente por areia quartzosa, freqüentemente encontrada em praias, e mangues; (c) *Latosolo*: esta zona é constituída essencialmente por solos pobres, isto é, com considerável percentagem de pedregulhos e rochas e com alta taxa de infiltração; (d) *Aluvial*: esta área está localizada após o reservatório Pirapama, e os valores dos parâmetros foram obtidos de acordo com Paiva (2000) quando aplicou o modelo à bacia do rio Gramame, localizada no Estado da Paraíba, devido ao fato destas bacias estarem inseridas numa mesma zona hidrológica; (e) *Arenosa*: essa zona ocorre na maior parte da bacia, principalmente na sub-bacia do posto pluviométrico Pirapama e é caracterizada por uma alta taxa de infiltração.

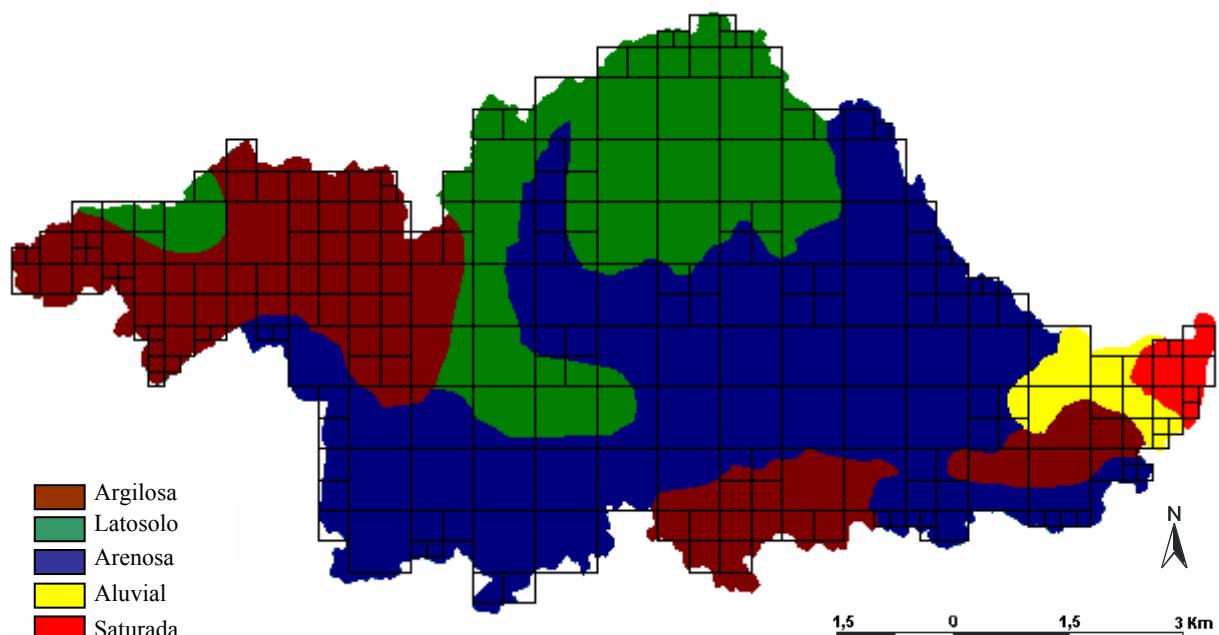


Figura 4.9 - Mapa das zonas hidrologicamente homogêneas da bacia Pirapama.

#### 4.5.4 Elementos da estrutura hidráulica

São considerados elementos da estrutura hidráulica os reservatórios construídos ou em projeto, as captações de água no rio, locais de transposição de vazões entre bacias

hidrográficas, postos fluviométricos, além de exutórios de sub-bacias; no entanto, só pode ser atribuído a cada quadrícula um elemento da estrutura hidráulica. Para a bacia do rio Pirapama, foram discretizadas 245 células, onde foram inseridos 15 elementos de estrutura hidráulica, dos quais: um exutório de bacia, 12 exutórios de sub-bacias, um posto fluviométrico e um ponto de captação d'água, como mostrado na Figura 4.10.

#### 4.5.5 Parâmetros do modelo Açumod

No modelo Açumod, o espaço geográfico da bacia é dividido numa malha retangular formada por células quadradas embutidas. Em cada quadrícula, diferentemente de como é feito pelo modelo Kineros2, o ciclo hidrológico é representado e simulado por um modelo hidrológico conceitual, através de um conjunto de quatro reservatórios que serão descritos na modelização do ciclo hidrológico, em que são indicados para cada quadrícula parâmetros descriptivos do ciclo hidrológico (Figura 4.11).

Para o conjunto de tanques que simulam o ciclo hidrológico são definidos os parâmetros como descritos na Tabela 4.2.

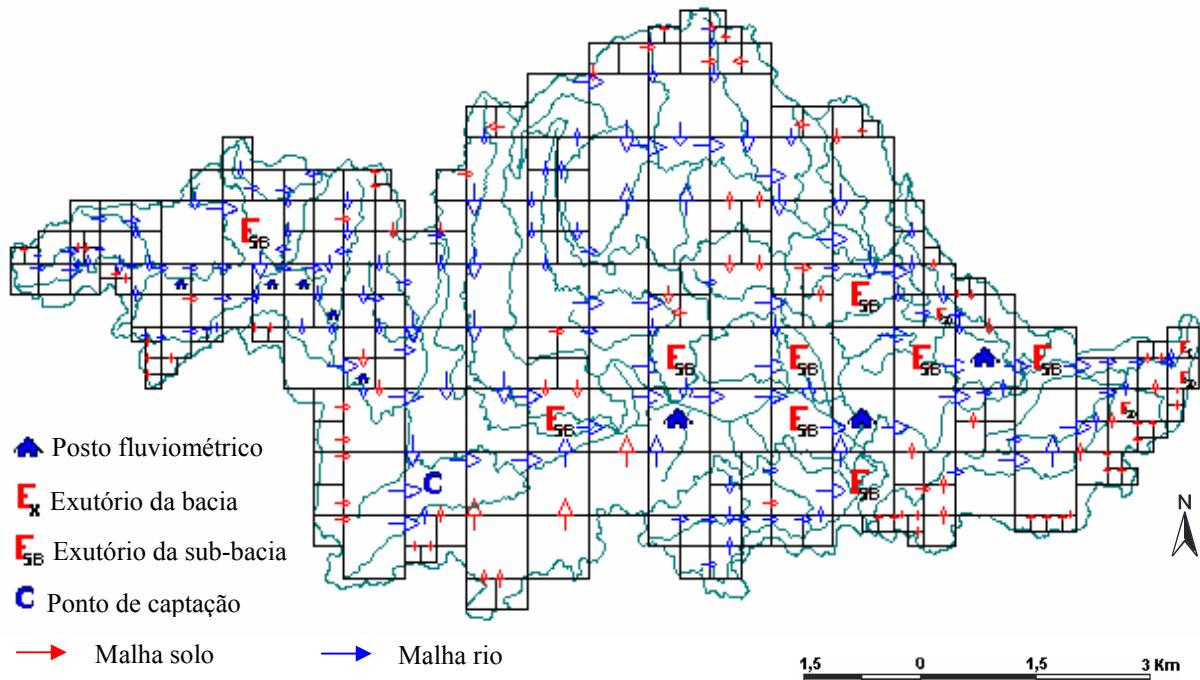


Figura 4.10 - Discretização e elementos da estrutura hidráulica.

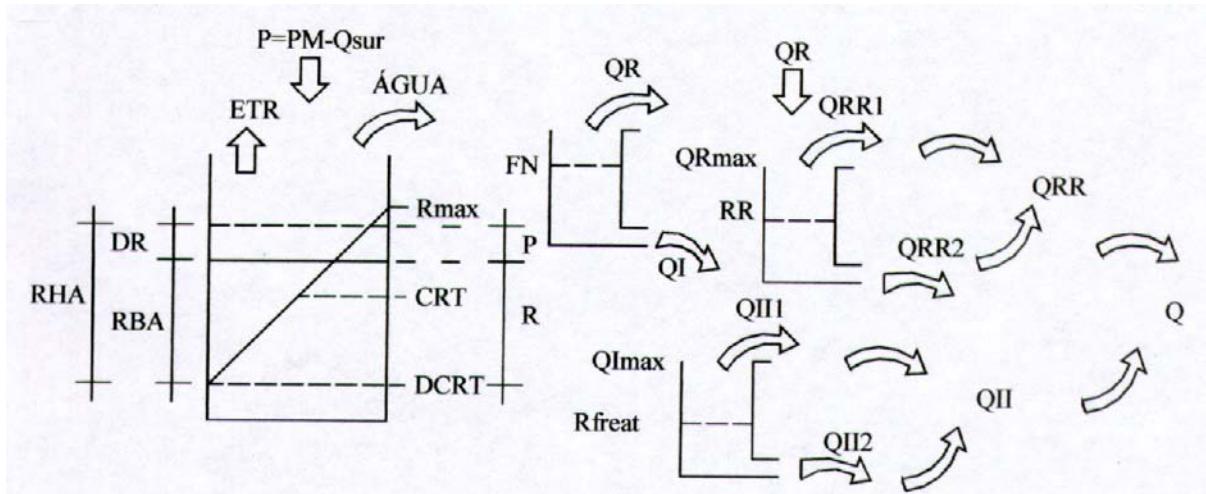


Figura 4.11 - Conjunto dos reservatórios que simulam o ciclo hidrológico no Açumod.

Tabela 4.2 - Descrição dos parâmetros do modelo Açumod

Parâmetros	Descrição
$PM$	precipitação total, em mm
$AGUA$	quantidade de água disponível para gerar os escoamentos, em mm
$Qsur$	termo referente ao escoamento superficial direto
$ETR$	evapotranspiração real, em mm
$Dr$	variação da quantidade de água no solo, em mm
$RHA$	reserva útil de água no solo posterior a precipitação, em mm
$RBA$	quantidade útil de água no solo, antes da precipitação, em mm
$Rmax$	reserva máxima de água no solo, acima do qual nenhuma água é retida no solo
$P$	parte da precipitação que será usada para gerar a porção de água, em mm
$R$	reserva de água ao final de cada passo de tempo, em mm
$CRT$	capacidade média de armazenamento de água no solo, em mm
$DCRT$	capacidade mínima de água no solo para gerar escoamento, em mm
$FN$	função de infiltração
$QR$	escoamento superficial, antes do retardamento no reservatório superficial
$QI$	escoamento infiltrado, antes do retardamento no reservatório subterrâneo
$QRmax$	representa o nível de transbordamento do reservatório de escoamento superficial
$RR$	nível de água inicial no reservatório de escoamento superficial, em mm
$QRR1$	componente que representa o escoamento superficial instantâneo
$QRR2$	componente que representa a vazão retardada em função do nível RR
$QRR$	parcela do escoamento superficial após passar pelo reservatório solo
$QIImax$	nível de transbordamento do reservatório de alimentação do lençol freático
$Rfreat$	nível de água no reservatório subterrâneo no tempo inicial
$QIII$	escoamento de base instantâneo
$QII2$	escoamento de base retardado em função do nível $Rfreat$
$QII$	parcela do escoamento infiltrado após passar pelo reservatório subterrâneo
$Q$	lâmina escoada para uma determinada unidade hidrológica homogênea

#### 4.6 Breve Descrição do Programa Grads e do Modelo de Circulação Atmosférica Regional

O Grads - *Grid Analysis and Display System* [Sistema de Análise e Apresentação de Grades] (DOTY et al., 1995) é um *software* essencialmente matemático para visualização, análise e tratamento de dados em pontos de grade. Para tanto, possui implementado em seu código fonte uma estrutura capaz de manipular dados em quatro dimensões: longitude (*X*), latitude (*Y*), altitude (*Z*) e tempo (*T*). Esse programa manipula dois tipos básicos de dados: os reticulados (em grade) e os de estações (pontuais).

Com relação à utilização do Grads, Chaves e Rodrigues (2001) ressaltam que é um dos programas mais utilizados em pesquisas na área das ciências atmosféricas e vem sendo empregado também em estudos de outras áreas do conhecimento, como na Hidrologia e na Matemática em todo o mundo. O programa Grads apresenta grande portabilidade, e pode ser utilizado nas principais estações de trabalho hoje conhecidas e em diversos tipos de ambiente, podendo ser implementado em sistemas UNIX (*workstations*), LINUX e DOS (micros), o que justifica sua grande difusão junto ao meio científico, além de poder ser adquirido livremente pela Internet.

Outra importante vantagem na utilização do programa Grads é a possibilidade do usuário invocar a execução de programas externos, além de gerar *scripts* (arquivos *.gs*) com linhas de comando com funções para manipular dados dentro do Grads.

Na área de pesquisas meteorológicas, constitui uma importante ferramenta que integra operações de acesso, manipulação e visualização de dados ambientais, além da grande interatividade oferecida, podendo ser utilizado livremente em estudos climatológicos urbanos nas mais diversas formas.

Quanto à representação de dados, existem duas opções para a gravação: ou eles estão gravados no formato próprio do Grads, isto é, em formato binário ou estão compactados em formato *GRIB* ou *NetCDF*. Esses dados são acessados e manipulados através de um arquivo descriptor com extensão *.ctl* (DOTY et al., 1995).

Neste trabalho, foram utilizados dados no formato binário em ponto de grade, gerados pelo MCGA – Modelo de Circulação Global Atmosférica aninhado a um MCRA – Modelo de Circulação Regional Atmosférica, como mostrado na Figura 4.12, que mostra o espaçamento da malha dos modelos global e regional e da área de estudo dessa Dissertação.

Atualmente, diversos estudos sobre modelagem climática regional têm enfatizado a importância de aplicações envolvendo o aninhamento de modelos de previsão climática global

e regional (HALL et al., 2000; ROADS e CHEN, 2000; ALTSHULER et al., 2002; MISRA et al., 2003; MISRA e KANAMITSU, 2004).

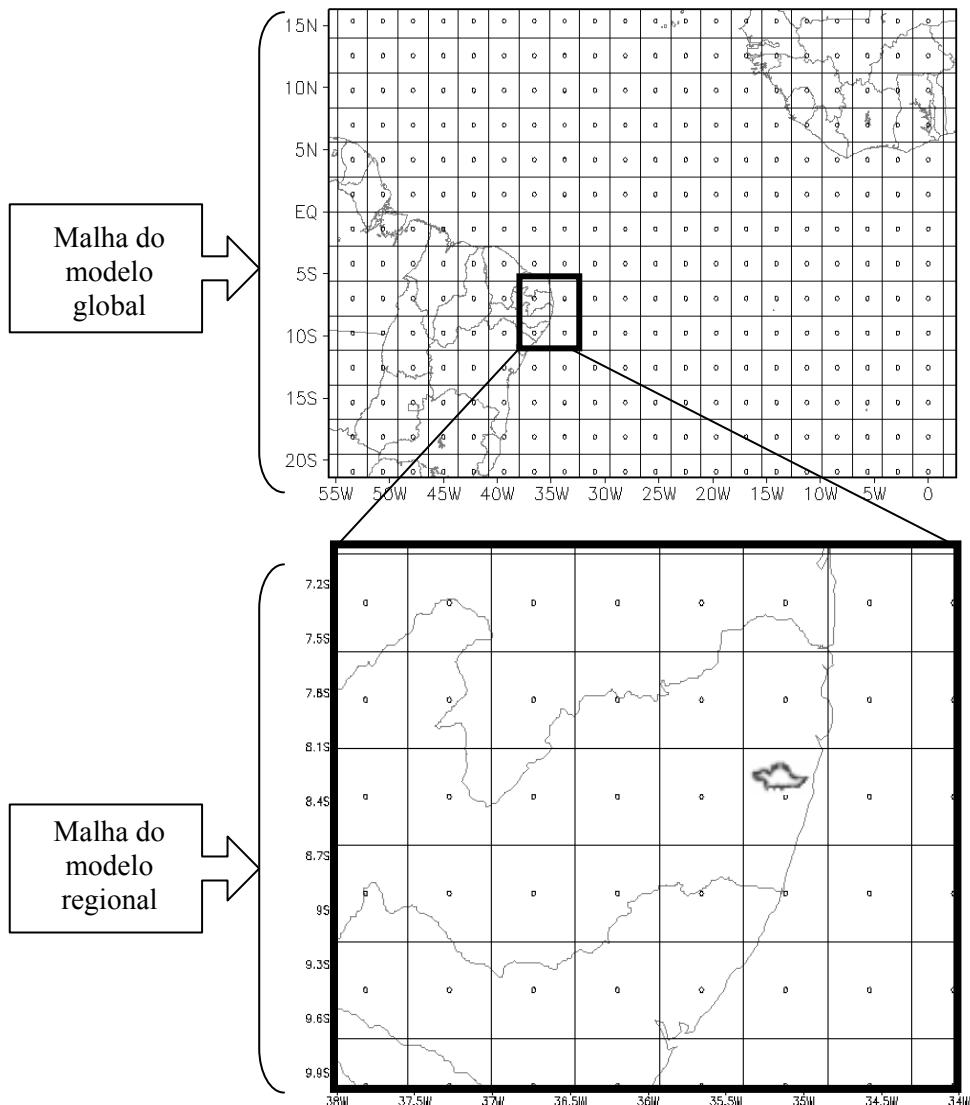


Figura 4.12 - Espaçamento da malha dos modelos global e regional e localização da bacia hidrográfica do rio Pirapama (adaptado de GALVÃO et al., 2005).

No presente trabalho, o modelo RSM – *Regional Spectral Model*, um MCRA, foi aninhado a um MCGA para realizar a previsão climática para a bacia do rio Pirapama. O RSM foi desenvolvido no NCEP – *National Center for Environmental Prediction*, localizado nos Estados Unidos, por Juang e Kanamitsu (1994), para trabalhar aninhado ao MCGA, também desenvolvido no NCEP, para prover maiores detalhes climáticos regionais, isto é, para produzir previsões climáticas numa escala menor.

Após os primeiros resultados das previsões do modelo RSM, Juang et al. (1997) modificaram o modelo para que o mesmo pudesse aumentar sua eficiência e sua funcionalidade nas previsões climáticas. Atualmente, o RSM é um modelo de circulação atmosférica regional usado para previsões diárias do tempo e do clima e também para longos períodos de previsões.

O RSM usa o sistema de coordenadas verticais do terreno e suas equações são integradas num esquema semi-implícito, enquanto que as equações de umidade e a de vorticidade são integradas explicitamente. Maiores detalhes e informações a respeito do modelo RSM podem ser encontrados em Juang et al. (1997), Hong e Leetma (1999), e Misra e Kanamitsu (2004).

Com o desenvolvimento de modelos cada vez mais complexos que representam a atmosfera e dos avanços no conhecimento integrado oceano-terra-atmosfera num único sistema, têm sido possível avanços significativos na previsão do tempo e do clima (WOOD et al., 2004). Dentre esses avanços destacam-se o aninhamento de modelos de previsão global e regional, desenvolvimento de técnicas de *downscaling*, e da união de modelos de previsão climática e modelos hidrológicos.

A partir desse desenvolvimento técnico-científico, a utilização integrada entre modelos de circulação global e regional tem atraído um número cada vez maior de usuários para simular e prever o clima regional em diversas regiões do mundo. Estas simulações e previsões regionais estão ajudando a comunidade a modelar a atmosfera numa resolução cada vez maior, como é o caso deste estudo que busca realizar a previsão hidrossedimentológica da bacia periurbana do rio Pirapama, através do acoplamento de modelos de previsão climática e hidrológica.

## 5 SIMULAÇÕES HIDROLÓGICAS E DO APORTE DE SEDIMENTOS NO RESERVATÓRIO PIRAPAMA

A modelagem dos processos hidrossedimentológicos continua sendo uma tarefa difícil do ponto de vista da representação destes processos por meio de equações matemáticas que os reproduzam.

Na bacia do rio Pirapama, utilizou-se para o estudo do seu comportamento hidrológico, dois modelos matemáticos de diferentes níveis de complexidade e uma discussão dos resultados é mostrada a seguir. Assim, no presente capítulo são apresentadas as aplicações do modelo hidrológico Açumod e do modelo hidrossedimentológico Kineros2 para a bacia do rio Pirapama.

### 5.1 Aplicação do Modelo Açumod na Bacia do Rio Pirapama

Para a aplicação inicial do modelo Açumod à bacia do rio Pirapama, foi escolhido o maior número de postos pluviométricos disponíveis com a maior série de dados de chuva observados. Os valores dos parâmetros *CRT*, *DCRT*, *CQI*, e *FN*, foram adotados baseados nas características físicas da bacia, ou em estudos similares realizados em bacias hidrográficas próximas à bacia do rio Pirapama, como será mostrado a seguir.

### 5.1.1 Dados de entrada

Os dados de entrada do modelo Açumod são os dados diários de precipitação e os dados mensais de evapotranspiração potencial. Os dados de precipitação foram obtidos dos postos pluviométricos Pombos, Engenho Cachoeirinha e Pirapama junto à ANA – Agência Nacional de Águas e ao LAMEPE – Laboratório de Meteorologia do Estado de Pernambuco. Esse período foi escolhido por possuir a maior série de dados observados de precipitação para a maior quantidade de postos disponíveis na bacia e nas suas proximidades.

Os dados de fluviometria foram obtidos do posto Pirapama junto à ANA – Agência Nacional de Águas para o período de 1987 a 2001, período que coincide com a chuva observada.

Para a implantação dos dados observados de chuva e vazão no modelo para o início do processo de calibração e validação do modelo, a série foi dividida em duas partes. A primeira seria voltada para a calibração do modelo, de janeiro de 1987 a dezembro de 1994, período de oito anos, e o restante da série foi utilizado para a validação do modelo que corresponde a um período de sete anos, de janeiro de 1995 a dezembro de 2001.

Os dados evaporimétricos utilizados no modelo foram baseados nos valores calculados por Silva Júnior et al. (2000), através do tanque *Classe A*, aplicado no estudo da modelagem da vazão da bacia do rio Gramame, uma vez que esta bacia, está localizada próxima à bacia do rio Pirapama.

Outras informações de entrada para o modelo Açumod são necessárias e foram obtidas através das características físicas da bacia:

(a) Tempo de concentração da água na – medida igual ao tempo em que a chuva que cai no ponto mais distante do exutório da bacia hidrográfica leva para atingi-lo, foi calculado pela equação do CHPW – *California Highways and Public Works* (17):

$$T_c = \left( \frac{0,87 \times L^3}{H} \right)^{0,385} \quad (17)$$

onde  $T_c$  é o tempo de concentração em horas,  $L$  é o comprimento do talvegue em quilômetros, e  $H$  é a diferença de cotas entre o ponto mais afastado da bacia e o ponto considerado em m, dada através da seguinte relação:  $H = L \times I$ , onde  $I$  é a declividade equivalente constante em m/m. Para a bacia do rio Pirapama com  $L = 80,6$  km e  $H = 0,403$ , o tempo de concentração foi calculado como sendo igual a 8,91 dias.

- (b) Coeficiente de perdas na rede de drenagem – para essa informação de entrada foi adotado o percentual igual a 15% estimado a partir de Paiva (2000), considerando que as perdas para a rede de drenagem da bacia do rio Pirapama são aproximadas às da bacia do rio Gramame, conforme observações feitas nos mapas de drenagem da bacia do rio Pirapama.
- (c) Altura representativa de inundação – esse dado de entrada é medido em milímetros e também foi baseado em Paiva (2000) e Silva Júnior (2000), que calcularam a altura representativa de inundação igual a 5 mm, baseados nos mapas dos tipos de solos e da geologia da bacia do rio Gramame. Para a bacia do rio Pirapama, esse parâmetro recebeu o mesmo valor da bacia do rio Gramame, uma vez que os solos constituintes das bacias são similares.

### 5.1.2 Resultados da calibração do modelo Açumod

*A priori* foram definidos os valores dos parâmetros do modelo a partir dos valores calibrados e validados através dos estudos de Paiva (2000) e Silva Júnior et al. (2000) para a bacia do rio Gramame. A calibragem dos parâmetros para a bacia do rio Pirapama foi realizada através do método de tentativa e erro, comparando-se a média mensal da vazão observada com a média mensal da vazão calculada no posto fluviométrico Pirapama.

A Tabela 5.1. mostra os valores dos parâmetros calibrados para as cinco zonas hidrológicas homogêneas. Dentre os parâmetros mais sensíveis durante a parametrização do modelo, destacam-se: (a) *CRT*, que corresponde à capacidade média de armazenamento de água no solo, em milímetros; (b) *DCRT*, que representa a capacidade de armazenamento de água no solo, abaixo da qual não há escoamento, também medido em milímetros; (c) *CQI*, coeficiente que simula a descarga dos reservatórios intermediários, muito sensível nas zonas onde o escoamento de base é elevado; e (d) *FN*, parâmetro da função de infiltração, quando positivo, permite apenas que a água infiltre e, quando negativo, torna possível a infiltração e o escoamento da água; isto é, para solos profundos esse parâmetro deve receber valores inferiores a zero, assim, quanto mais espesso for o solo, menor deverá ser o valor atribuído à zona correspondente. O parâmetro *FN* foi ajustado com esses valores, pois a bacia do rio Pirapama está localizada sobre uma formação do tipo sedimentar, a qual caracteriza-se por possuir solos argilosos e profundos.

Tabela 5.1 - Parâmetros calibrados do modelo Açumod

Parâmetros	<i>CRT</i>	<i>DCRT</i>	<i>CMR</i>	<i>FN</i>	<i>QRmax</i>	<i>CQR</i>	<i>QImax</i>	<i>CQI</i>
Argiloso	51	28	4,5	-450	700	0,004	800	300
Latosol	155	25	4,5	-90	600	0,010	50	20
Saturado	90	30	4,5	-60	650	0,008	400	70
Aluvial	62	30	4,5	-85	850	0,007	250	30
Arenoso	130	70	4,5	-70	450	0,030	80	10

A bacia do rio Pirapama não se mostrou sensível para a calibração dos parâmetros *CMR*, *QRmax*, *CQR* e *QImax*, uma vez que os mesmos não apresentaram influência nos volumes calculados pelo modelo e não precisaram de maiores ajustes dos seus valores, e assim, os recomendados por Paiva (2000) e Silva Júnior (2000) foram mantidos.

A Figura 5.1 mostra o ajuste entre as vazões mensais observadas e calculadas no período de 1987 a 1994 para o posto Pirapama, cujos valores estão apresentados na Tabela A.1 do Apêndice A, juntamente com a precipitação média observada. A precipitação apresentada na Figura 5.1 é a média de Thiessen dos três postos selecionados. Na realidade, o modelo usa os valores dos três postos em seus cálculos e a média de Thiessen é apenas usada para apresentar o hietograma final da bacia, na respectiva figura. Os indicadores de qualidade da calibragem do modelo encontram-se na Tabela 5.2.

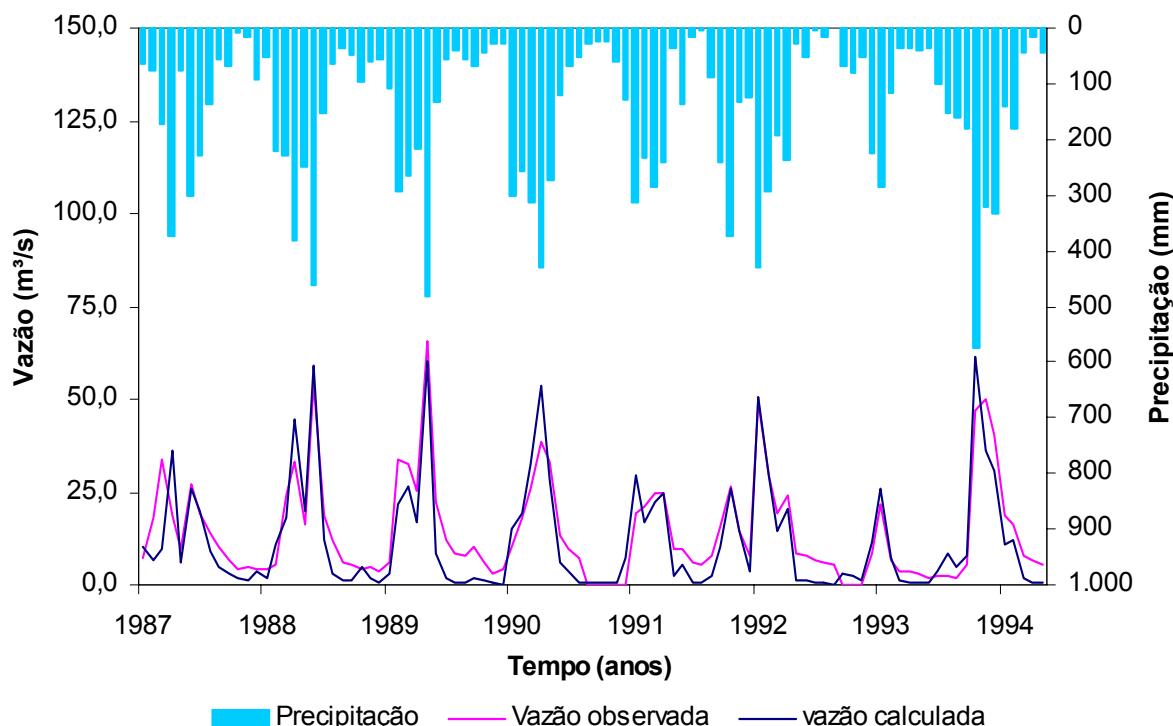


Figura 5.1 - Hietograma médio observado e hidrogramas observado e calculado para o posto Pirapama durante a calibração do modelo.

Tabela 5.2 - Indicadores da qualidade da calibração do modelo Açumod

Indicadores	Vazão calculada (m <sup>3</sup> )	Vazão observada (m <sup>3</sup> )
Volume (m <sup>3</sup> )	9.849.254.400	11.796.019.200
Média (m <sup>3</sup> /s)	3.115	3.730
Diferença (%)		-16,50
*Pbias		-2,35
Correlação (R)		0,91

\* representa o valor médio dos resíduos, esse valor deve ser o menor possível.

O hidrograma obtido durante o processo de calibração mostra que o resultado da modelagem pode ser considerado animador e que o modelo pode ser usado para representar o volume observado e o comportamento da vazão na bacia.

Os resultados da aplicação podem ser considerados satisfatórios, pois foi obtido um coeficiente de correlação igual a 0,91 e a diferença entre o volume escoado observado e o calculado foi de -16,50%.

### 5.1.3 Resultados da validação do modelo Açumod

A validação de um modelo hidrológico é realizada com objetivo de verificar se os parâmetros encontrados na calibração do modelo representam fidedignamente as características da bacia e, assim, poderão ser usados para simulações futuras. Desta forma, tem-se um grau de confiabilidade para geração de vazão pelo modelo para outros períodos, principalmente no que se refere a sua utilização em estudos de monitoramento de níveis de reservatórios, seja para o controle de enchentes ou para o abastecimento d'água.

A validação do modelo foi realizada a partir dos parâmetros apresentados na Tabela 5.1, e da comparação dos dados de vazões calculadas e observadas do posto fluviométrico Pirapama, no período de sete anos, de janeiro de 1995 a dezembro de 2001. Os dados de vazão referentes ao ano de 2002 para o posto Pirapama não foram utilizados na validação do modelo devido a pouca confiabilidade dos valores observados, pois com a construção da Barragem Pirapama, localizada a montante do posto Pirapama, a série de vazão para esse posto ficou “perturbada”, ou seja, a partir dessa época, a vazão natural do rio foi alterada.

Para a validação do modelo, foi obtido o coeficiente de correlação de 0,94, como mostrado na Tabela 5.3. A Figura 5.2 apresenta a precipitação média da bacia calculada pelo

método de Thiessen e são expostas as vazões calculadas pelo modelo e as vazões observadas no período de 1995 a 2001. Essa figura apresenta o gráfico da validação do modelo com o hietograma observado e os hidrogramas de vazões observadas e calculadas. Os resultados da simulação estão contidos na Tabela a.2 do Apêndice A.

Os resultados obtidos são animadores, e dessa forma, o modelo pode ser considerado como uma ferramenta promissora na simulação de vazões em qualquer ponto da bacia, o que atende os propósitos do presente trabalho.

Tabela 5.3 - Indicadores de qualidade da validação do modelo Açumod

Indicadores	Vazão calculada (m <sup>3</sup> )	Vazão observada (m <sup>3</sup> )
Volume (m <sup>3</sup> )	10.235.116.800	8.610.624.000
Média (m <sup>3</sup> /s)	3.237	2.723
Diferença (%)		18,87
*Pbias		2,24
Correlação (R)		0,94

\* representa o valor médio dos resíduos, esse valor deve ser o menor possível.

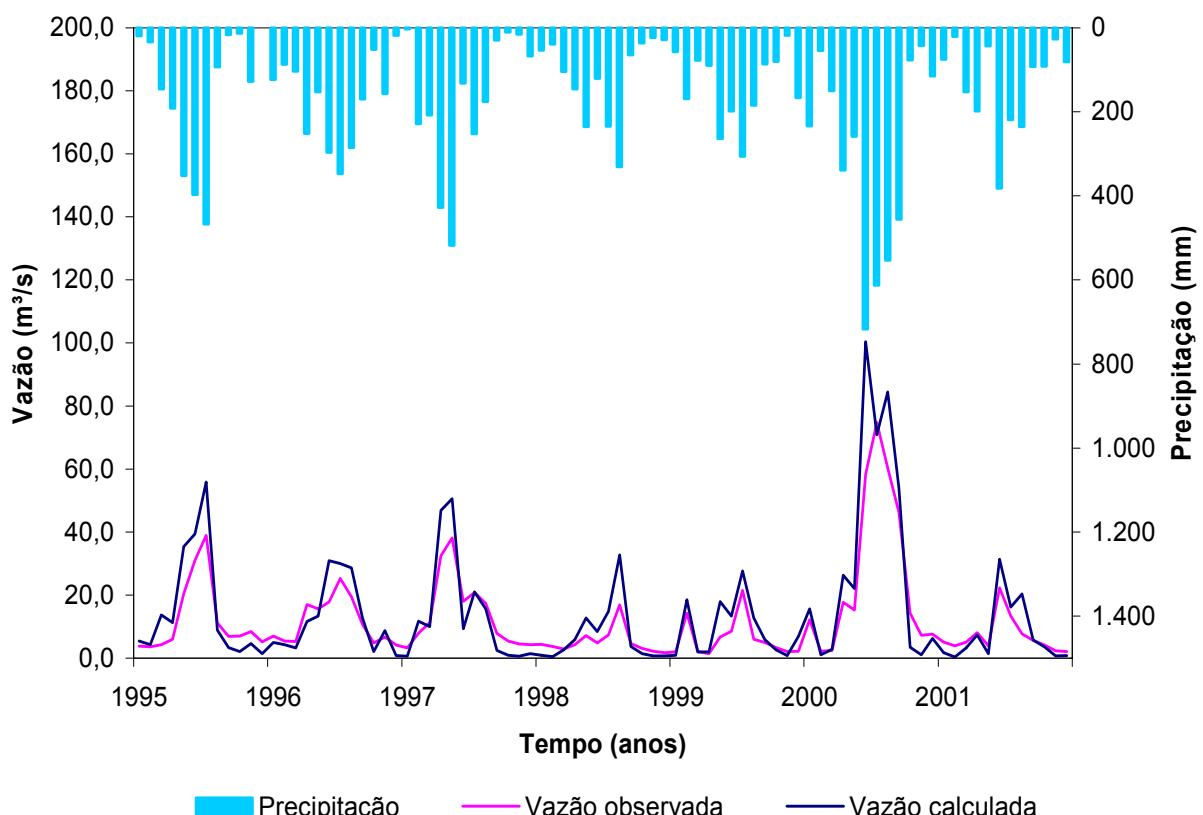


Figura 5.2 - Hietograma médio observado e hidrogramas observado e calculado para o posto Pirapama durante a validação do modelo.

## 5.2 Aplicação do Modelo Kineros2: Resultados para a Bacia Pirapama

Dentre um vasto número de modelos hidrológicos citados na literatura e aplicados em diversos estudos, foi escolhido para esse trabalho o modelo chamado Kineros2. Ele foi selecionado por se tratar de um modelo distribuído e de base física, o qual permite que os parâmetros sejam ajustados para um ou dois perfis de camada de solo, e que pode ser usado na modelagem da vazão e dos processos de erosão em bacias tanto urbanas quanto rurais, ideal para o estudo proposto. A utilização deste modelo foi uma tentativa de aplicação de um modelo de base física de conversão chuva-vazão-erosão na bacia periurbana do rio Pirapama, com o propósito de testar uma ferramenta, teoricamente bem fundamentada, que pudesse adequadamente reproduzir o comportamento da vazão e da produção de sedimentos da região estudada.

O modelo Kineros2 vem sendo aplicado em várias pesquisas de modelagem de vazão e erosão em diversas bacias, tanto de clima úmido (SANTOS et al., 2001b), como de regiões do semi-árido (LOPES, 2003). Estão expostos aqui os resultados da modelagem da vazão e da produção de sedimentos para o ano de 2000, período este escolhido por se tratar de um ano considerado como acima do normal do ponto de vista da média pluviométrica observada para os postos da bacia. A precipitação média anual da bacia foi calculada através do método de Thiessen com os dados observados de três postos pluviométricos da região (Pombos, Engenho Cachoeirinha e Pirapama), e estão apresentados na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 - Precipitação média calculada pelo método de Thiessen a partir dos dados observados dos postos Pombos, Engenho Cachoeirinha e Pirapama

Ano	Precipitação média observada (mm)
1987	1.252
1988	2.240
1989	1.543
1990	1.910
1991	1.194
1992	1.975
1993	727
1994	1.937
1995	2.027
1996	2.047
1997	1.892
1998	1.224
1999	1.375
2000	3.401
2001	1.463

### 5.2.1 Discretização espacial da bacia do rio Pirapama

A discretização da bacia do rio Pirapama numa cascata de planos e canais foi feita a partir do mapa topográfico da bacia (Figura 5.3). A Figura 5.4 apresenta a determinação dos elementos planos e canais na discretização da bacia Pirapama.

Essa base digital foi obtida a partir da digitalização de todas curvas de nível (com eqüidistância de 40 m) das Cartas Topográficas de Vitória de Santo Antão e Recife, ambas na escala de 1:100.000. Para facilitar na discretização da bacia hidrográfica foi gerado um MNT – Modelo Numérico do Terreno da bacia do rio Pirapama (Figura 5.5). Na discretização da bacia, além da topografia, levou-se em consideração as características geológicas e pedológicas dos elementos planos discretizados da bacia, e os comprimentos das linhas de fluxo.

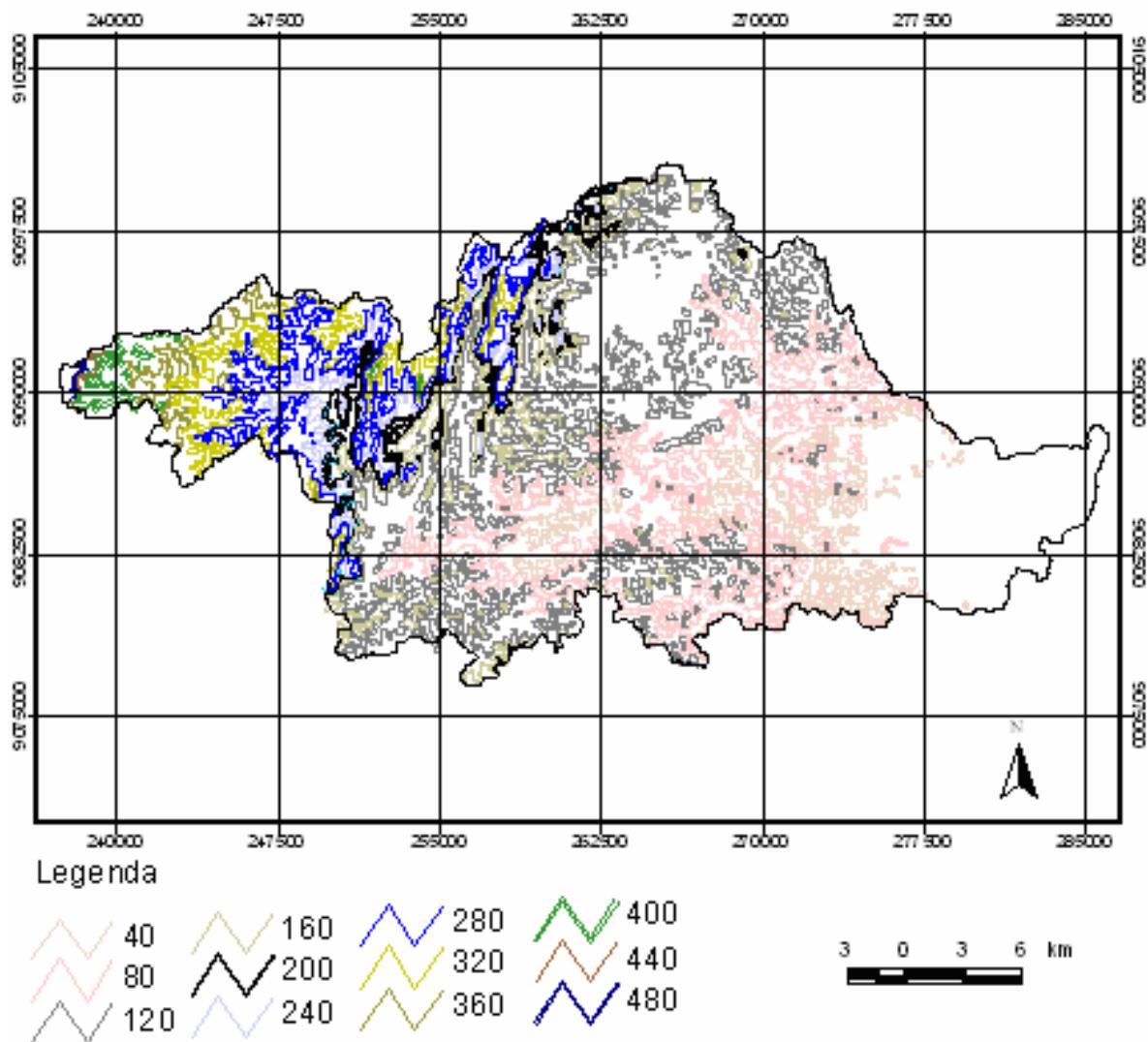


Figura 5.3 - Altimetria da bacia do rio Pirapama.

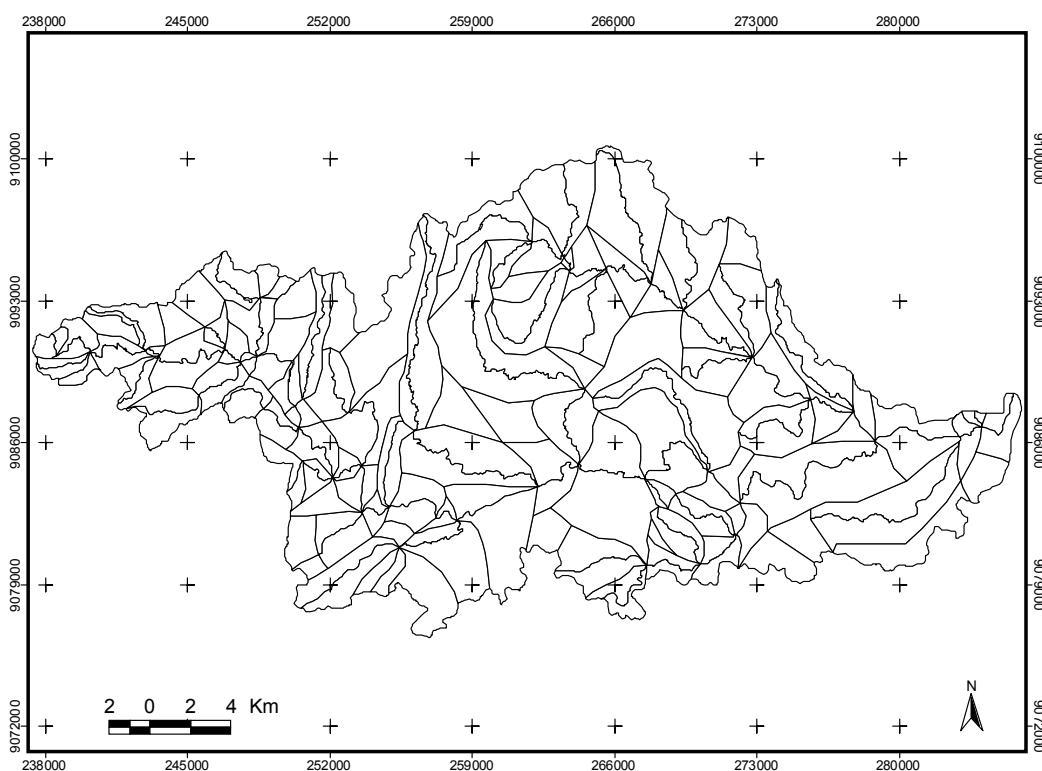


Figura 5.4 - Discretização da bacia do rio Pirapama.

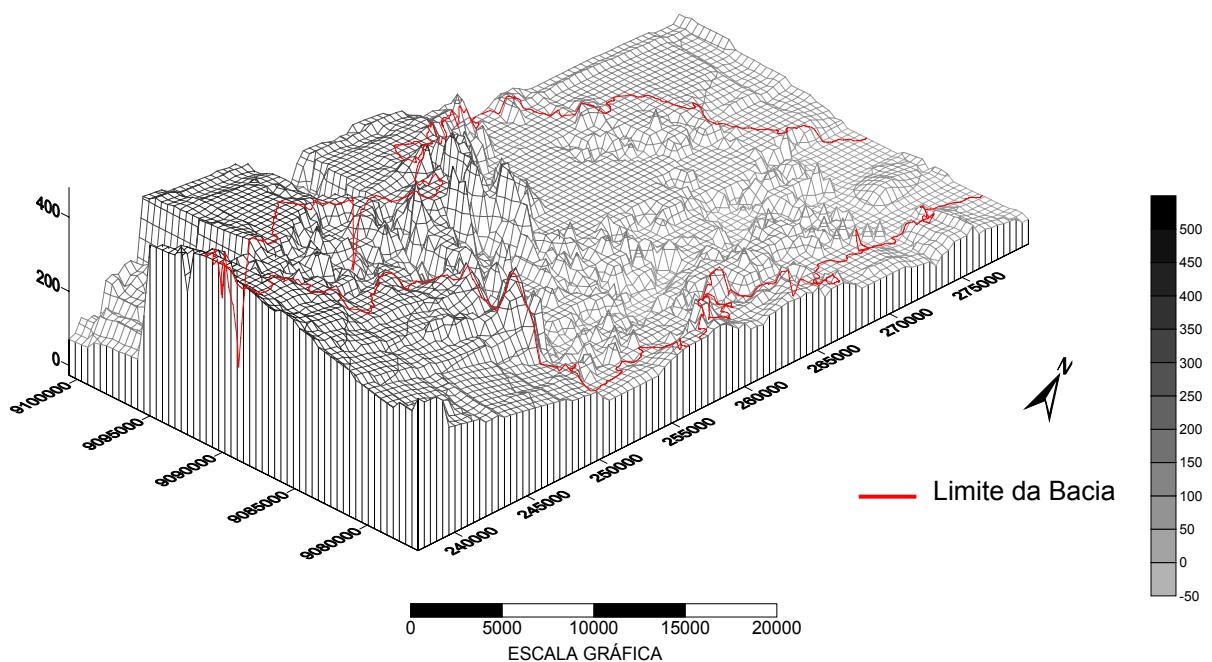


Figura 5.5 - Modelo Numérico do Terreno da bacia hidrográfica do rio Pirapama.

A bacia foi discretizada com o objetivo de tornar cada elemento plano ou canal o mais homogêneo possível, isto é, com uma declividade e características de solo e cobertura vegetal constantes. As dimensões dos elementos foram determinadas através de medições utilizando-se técnicas computacionais no mapa topográfico em formato digital.

Cada elemento plano foi transformado em retângulos, cujas dimensões foram elaboradas medindo-se as linhas de fluxo definidas pelas curvas de nível do mapa de relevo, cujo valor seria o comprimento do plano. A largura do plano foi determinada dividindo-se a área do elemento plano, medida no mapa, pelo comprimento da linha de fluxo. As declividades dos planos e canais foram determinadas pelo quociente entre a diferença da cota ao longo da linha de fluxo.

A bacia Pirapama foi então discretizada em 267 elementos, dos quais 174 são planos e 93 são canais. As características geométricas e a seqüência de cálculo dos elementos da bacia do rio Pirapama pelo modelo Kinerpodem ser vistas na Quadro B.1 do Apêndice B.

### 5.2.2 Estimativa dos parâmetros do modelo Kineros2

O modelo Kineros2 utiliza um conjunto de parâmetros de entrada que podem ser agrupados em três categorias: (a) parâmetros que podem ser determinados com base nas informações disponíveis na literatura; (b) parâmetros cujos valores podem ser medidos através de experimentos em campo ou em laboratório; e (c) aqueles que podem ser determinados pela calibração do modelo através do método de tentativa e erro ou utilizando-se mecanismos de autocalibração, dentre os quais, por exemplo, algoritmos genéticos, como apresentado em Santos et al. (2005a) que calibrou parâmetros do modelo de chuva-vazão-erosão chamado WESP – *Watershed Erosion Simulation Program*, utilizando a técnica de autocalibração através do uso do algoritmo genético SCE-UA – *Shuffled Complex Evolution-University of Arizona*.

Os parâmetros utilizados na modelagem do escoamento superficial e da erosão do solo para a bacia do rio Pirapama foram ajustados baseados nas características físicas da bacia, de acordo com o tipo de solo, do percentual de cobertura vegetal e da declividade nos elementos discretizados.

Como o Kineros2 é um modelo de base física, seus parâmetros são representados em uma ou duas camadas de solo ao longo de toda a bacia. A Tabela 5.5 apresenta o intervalo dos valores dos parâmetros ajustados para a camada superior de solo obtidos durante o processo

de calibração. Na Tabela 5.6 podem ser conferidos a variação dos valores dos parâmetros que são ajustados para as duas camadas de solo.

Para poder obter melhores resultados, utilizou-se o ajustamento dos parâmetros às duas camadas de solo. Os valores dos parâmetros para cada elemento discretizado da bacia podem ser vistos no Quadro C.1 do Apêndice C.

Tabela 5.5 - Parâmetros para a camada superior de solo usados no processo de calibração

Parâmetros	Símbolo	Camada superior
Espessura da camada superior de solo	$H$	300 – 550 mm
Espaçamento médio da microtopografia	$S_p$	0,1 – 0,3 m
Altura da interceptação	$I_n$	0,76 – 0,90 mm
Saturação inicial do solo	$S_i$	0,4 – 0,9
Fração da cobertura vegetal	$C$	1 – 2
Coeficiente de rugosidade de Manning	$n$	0,06 – 0,08

Tabela 5.6 - Parâmetros para as duas camadas de solo usados no processo de calibração

Parâmetros	Símbolo	Camada superior	Camada inferior
Capilaridade média do solo	$G$	20 – 46 mm	12 – 23 mm
Condutividade hidráulica saturada do solo	$K_s$	3 – 3,6 mm/hr	0,5 – 0,8 mm/hr
Fração volumétrica de rocha	$R_o$	0,1 – 0,2	0,1 – 0,2
Porosidade	$\phi$	0,15 – 0,45	0,13 – 0,25

Com relação aos parâmetros calibráveis do modelo, os mais relevantes durante esse processo foram:

- Porosidade ( $\phi$ ) - os valores de porosidade foram estipulados de acordo com o tipo de solo de cada elemento plano discretizado, baseando-se nos valores recomendados por Rawls et al. (1991) (Tabela 5.7). Os valores de porosidade ajustados para a bacia se mostraram dentro do estipulado na literatura.
- Saturação efetiva ( $S_i$ ) - a princípio foram usados os valores propostos também por Rawls et al. (1991), como mostrado na Tabela 5.7; entretanto, os valores finais da calibração acabaram sendo bem distintos com relação aos valores propostos na literatura pesquisada. Assim, para ajustar o volume calculado ao observado, optou-se pelo uso de alguns valores acima do recomendado por Rawls et al. (1991) nos elementos planos com tipo de solo variando de argiloso a franco argilo arenosos. O Quadro C.1 do Apêndice C, apresenta os valores de  $S_i$  para cada elemento plano discretizado da bacia Pirapama.

- c) Capilaridade média do solo ( $G$ ) - esse parâmetro foi calibrado de acordo com o tipo de solo encontrado em cada plano discretizado da bacia. Seus valores foram obtidos também de acordo com os valores apresentados na Tabela 5.7.
- d) Fração volumétrica de rocha ( $R_o$ ) - esse parâmetro foi ajustado baseando-se no mapa geológico da bacia. Como a bacia do rio Pirapama está localizada numa formação sedimentar, optou-se por calibrar esse parâmetro com os menores valores possíveis, como 0,1 para a primeira camada de solo de todos os planos, e 0,2 para a segunda camada de solo de todos os planos.
- e) Condutividade hidráulica saturada do solo ( $K_s$ ) - esse parâmetro mostrou-se, ao longo do período de calibração, como sendo o mais sensível durante esse processo. Sua calibração ocorreu a partir de diversos estudos de modelagem da vazão elaborados por Santos et al. (2001b) que estimaram seu valor a partir de dados da bacia *Ishite*, localizada no Japão, com o propósito de avaliar a aplicação futura do modelo para bacias do Nordeste do Brasil com mais de 100 km<sup>2</sup>. Os valores do parâmetro  $K_s$  foram assim reajustados para este trabalho e foram publicados em Silva et al. (2004) e Santos et al. (2005).

Tabela 5.7 - Guia de estimativa para propriedades hidráulicas do solo proposto por Rawls et al. (1991)

Classes de solo	Porosidade ( $\phi$ )	Saturação efetiva ( $S_i$ )	Capilaridade média do solo ( $G$ ) (cm)
Arenoso	0,437 - 0,063	0,417 - 0,063	5,0
Areia franca	0,437 - 0,069	0,401 - 0,062	7,0
Franco arenoso	0,453 - 0,102	0,412 - 0,129	13,0
Franco	0,463 - 0,088	0,434 - 0,100	11,0
Franco siltoso	0,501 - 0,081	0,486 - 0,092	20,0
Franco argiloso arenoso	0,398 - 0,066	0,330 - 0,095	26,0
Franco argilo	0,464 - 0,055	0,390 - 0,111	26,0
Franco argilo siltoso	0,471 - 0,053	0,432 - 0,085	35,0
Argilo arenoso	0,430 - 0,060	0,321 - 0,114	30,0
Argila siltosa	0,479 - 0,054	0,423 - 0,089	38,0
Argila	0,475 - 0,048	0,385 - 0,116	41,0

- f) Coeficiente de rugosidade de *Manning* ( $n$ ) para os planos - esse parâmetro foi estimado pelo ajuste do hidrograma observado através do método de tentativa e erro para ajustar as vazões calculadas aos valores observados, e como os tipos de solo da bacia do rio Pirapama são

argilosos, adotou-se valores acima do recomendado da literatura, e assumiu valores entre 0,06 e 0,08, como pode ser conferido no Quadro C.1 do Apêndice C.

### 5.2.3 Calibração do modelo Kineros2

Com relação aos dados pluviométricos, foram empregados dados de três postos localizados na bacia selecionados de acordo com sua distribuição espacial, a fim de melhor representar a chuva na bacia. Após a seleção dos postos pluviométricos, foi realizada a associação dos postos pluviométricos para cada plano discretizado da bacia.

A calibração do modelo foi realizada a partir da comparação dos valores calculados e os dados de vazão observados no ano de 2000 em quatro postos fluviométricos da bacia: Ponte PE-35, Destilaria Inexport, Pirapama e Destilaria Bom Jesus. Nas Figuras 5.6 a 5.9 estão apresentadas respectivamente as comparações gráficas entre as vazões calculadas e observadas dos postos fluviométricos Ponte PE-35, Destilaria Inexport, Pirapama e Destilaria Bom Jesus, bem como o hietograma médio observado.

O ajuste dos valores de vazão calculada aos de vazão observada para o posto Ponte PE-35 mostrou que o modelo representou suficientemente os principais picos do escoamento, como mostrado na Figura 5.6.

A Figura 5.7 apresenta a comparação entre as vazões calculadas e as vazões observadas para o posto Destilaria Inexport. O ajuste entre esses valores se mostrou menos eficaz se comparado ao hidrograma do posto Ponte PE-35, pois o escoamento de base calculado pelo modelo ficou quase sempre acima dos valores observados. No entanto, a correlação obtida para o posto Destilaria Inexport foi uma das melhores entre todos os postos fluviométricos. Fato idêntico ocorreu também na calibração do posto Pirapama (Figura 5.8). Para esse posto, os resultados foram considerados satisfatórios, uma vez que a correlação obtida entre os volumes observados e calculados foi de 0,86. Esse valor pode ser avaliado como aceitável, pois a série utilizada para a calibração do modelo coincidiu com o período de represamento de água do rio Pirapama para a construção da barragem Pirapama, deixando a série fluviométrica para o posto Pirapama “perturbada”. Na calibração do posto Destilaria Bom Jesus (Figura 5.9) foram obtidos os melhores resultados da correlação entre os dados de vazão observada e calculada.

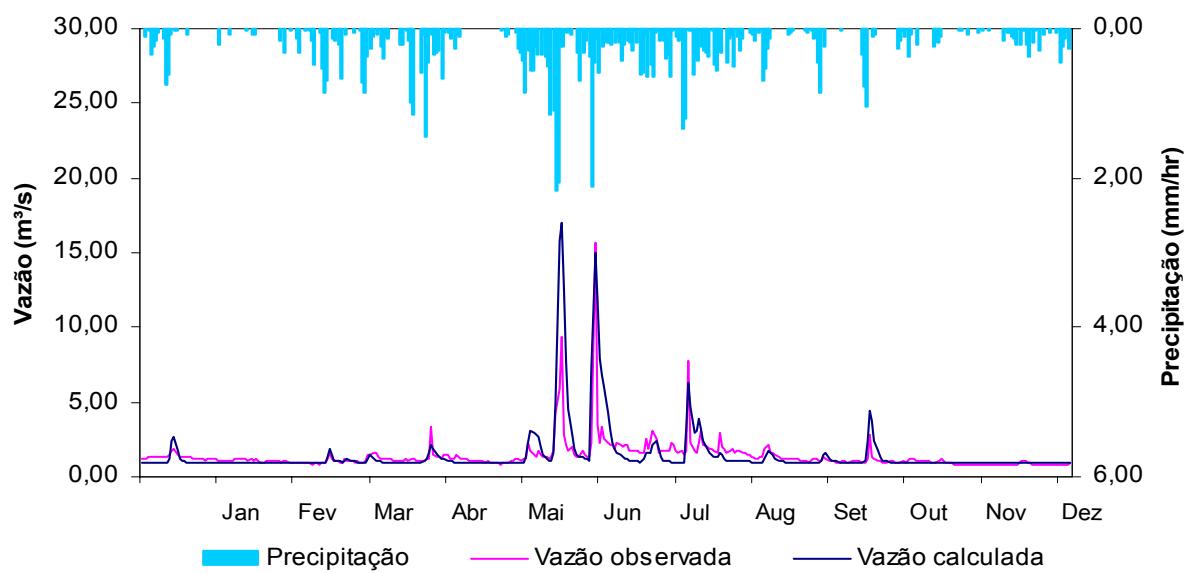


Figura 5.6 - Hietograma médio observado e hidrogramas observado e calculado para o posto fluviométrico Ponte PE-35.

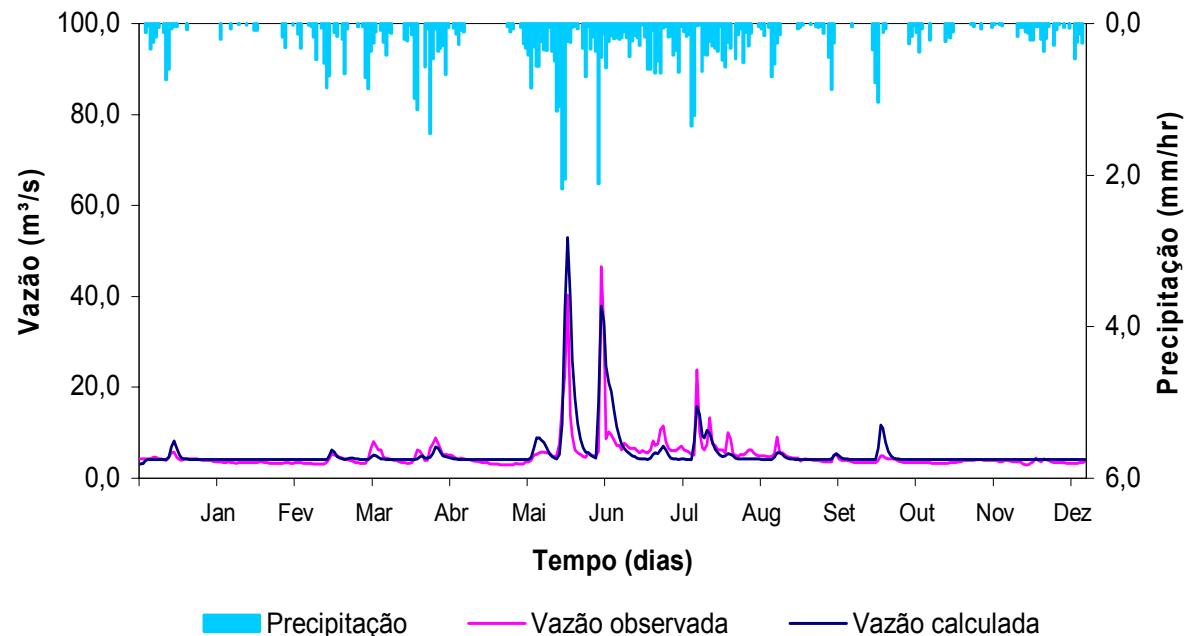


Figura 5.7 - Hietograma médio observado e hidrogramas observado e calculado para o posto fluviométrico Destilaria Inexport.

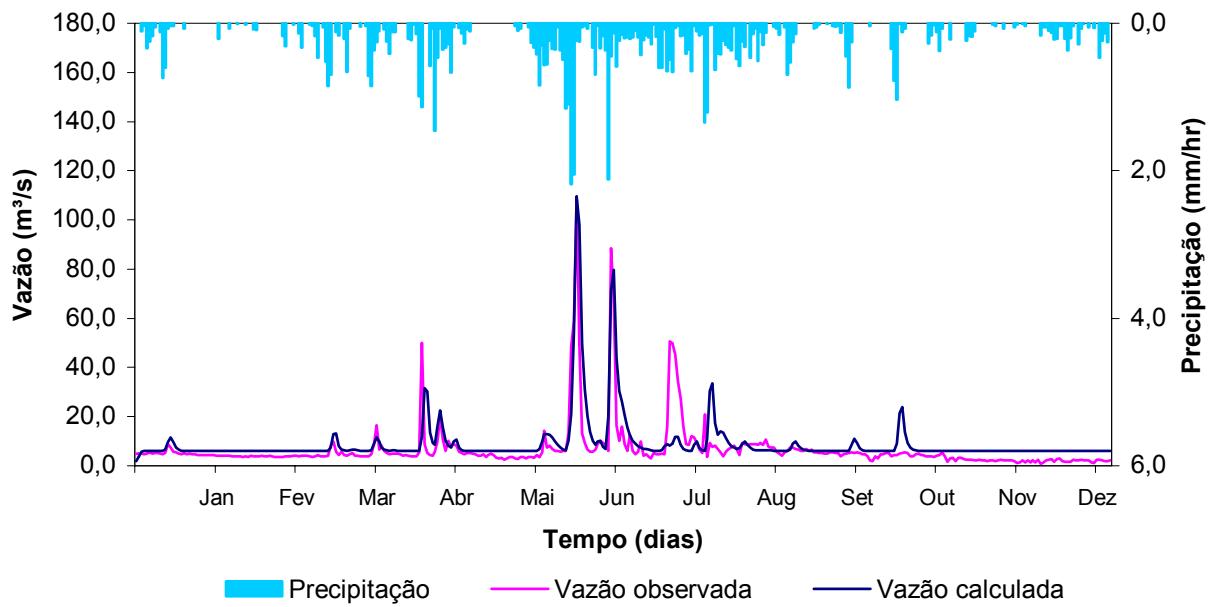


Figura 5.8 - Hietograma médio observado e hidrogramas observado e calculado para o posto fluviométrico Pirapama.

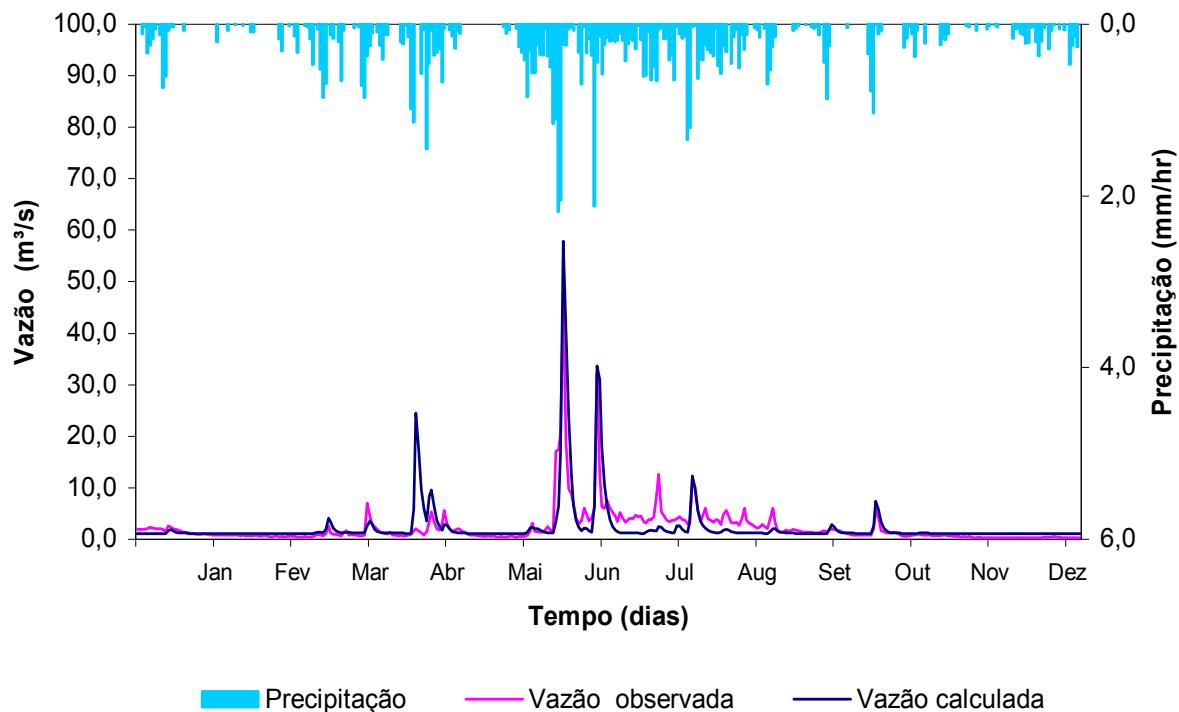


Figura 5.9 - Hietograma médio observado e hidrogramas observado e calculado para o posto fluviométrico Destilaria Bom Jesus.

O modelo Kineros2 também foi escolhido para a modelagem da vazão e da erosão para a bacia do rio Pirapama por se tratar de um modelo hidrossedimentológico distribuído, que calcula a vazão e a produção de sedimentos em qualquer ponto da bacia, assim, tornou-se

possível o cálculo das potencialidades hídricas de todas as sub-bacias que formam a bacia do rio Pirapama. Na Tabela 5.8 são apresentados os valores das vazões calculadas para cada sub-bacia para 2000.

Tabela 5.8 - Volumes calculados para cada sub-bacia em 2000

Nome da sub-bacia	Área (km <sup>2</sup> )	Vazão calculada (m <sup>3</sup> )
Arandu	11,59	5.250.363
Macacos	42,24	35.113.000
Cajabuçú	43,08	35.465.648
Pirapama (montante)	225,12	135.278.496
Gurjaú (montante)	88,54	22.274.910
Rio Gurjaú	14,56	83.299.440
Gurjaú (jusante)	26,65	552.699.328
Utinga de Cima	32,02	54.103.112
Manoel Gonçalves	17,99	54.998.272
Arroio Sicupema	13,94	7.756.602
Santa Emília	41,45	33.069.750
Pirapama (jusante)	42,94	917.801.472

Os resultados da calibração do modelo mostraram que as correlações ( $R$ ), as quais medem o nível de eficiência da calibração, variaram entre 0,84 e 0,88. Desta forma, pode-se ressaltar que o modelo obteve uma estimativa satisfatória em relação aos dados observados de vazão. Assim, a avaliação estatística dos resultados das simulações (Tabela 5.9) reforça a afirmativa de que o modelo pode ser considerado promissor para realizar simulações na bacia do rio Pirapama.

Tabela 5.9 - Qualidade da calibração do modelo Kineros2

Postos fluviométricos	Correlação ( $R$ )
Ponte PE-35	0,84
Destilaria Inexport	0,85
Pirapama	0,86
Destilaria Bom Jesus	0,88

#### 5.2.4 Produção de sedimentos: resultados e discussão

Sabe-se que somente parte do total de sedimentos erodidos numa bacia chega a sua foz. A essa fração denomina-se de produção de sedimentos. A razão entre a produção de sedimentos de uma bacia e o total erodido chama-se taxa de entrega de sedimentos. Essa taxa

de entrega é influenciada diretamente por vários fatores geomorfológicos e ambientais, incluindo a natureza, extensão e localização das fontes de sedimentos, relevo, hidrografia, condições dos canais, vegetação e do uso e tipo de solo (LOPES, 2003).

Para a estimativa da produção de sedimentos, foram calibrados os parâmetros relacionados ao processo de vazão, como listados nas Tabelas 5.5 e 5.6.

Os valores dos parâmetros que correspondem ao processo de erosão, foram baseados em valores encontrados na literatura, segundo Rawls et al. (1991), e ajustados através do método de tentativa e erro, visando a aproximação entre os valores de vazão calculados aos observados. Os parâmetros ajustados, foram:

- a)  $c_f$  - que representa o parâmetro da erosão causada pelo impacto das gotas de chuva no solo, e pode ser visto na equação (12), no arquivo de entrada do modelo Kineros2 esse parâmetro recebe o nome de *Splash*; e
- b)  $C_o$  - que representa o coeficiente de coesão do solo, pode ser conferido na equação (14), no arquivo de entrada do modelo Kineros2 esse parâmetro recebe o nome de *Cohesion*.

Deve-se salientar que a rede de dados sedimentométricos na região Nordeste do Brasil é praticamente inexistente, havendo apenas uma pequena série de valores observados coletados no reservatório de Sobradinho, o que reforça a importância de estudos como este e justifica a decisão de se usar um modelo distribuído e de base física para se estimar a produção de sedimentos de uma bacia não instrumentada.

Usando os valores dos parâmetros do Quadro C.1 do Apêndice C, e a chuva observada para 2000, obtém-se o total da produção de sedimentos estimada para a bacia seria de 96,45 ton para o mesmo ano. A Figura 5.10 mostra o sedigrama calculado para a bacia do rio Pirapama em 2000, onde constatou-se que o período de maior produção de sedimentos ocorrido na bacia, foi entre os meses de maio a julho, correspondendo ao período mais chuvoso da bacia.

Como a bacia do rio Pirapama apresenta solos heterogêneos apresentando a montante da bacia solos com altas taxas de permeabilidade e à jusante da bacia solos com alta relação textural de argila entre os horizontes *A* e *B*, foi calculado o total produzido de sedimentos para quatro classes de partículas de solo, como mostrado na Figura 5.11. A classe de partícula que mais contribuiu para a produção de sedimentos foi a classe 0,05 mm, responsável por 1.067,16 ton/ha, o que representou 43,21% do total da produção de sedimentos. A menor

produção de sedimentos por classe de partícula de solo ficou a cargo da classe de 0,5 mm, que produziu 14,27 ton/ha (0,6% do total), como mostrado na Tabela 5.10.

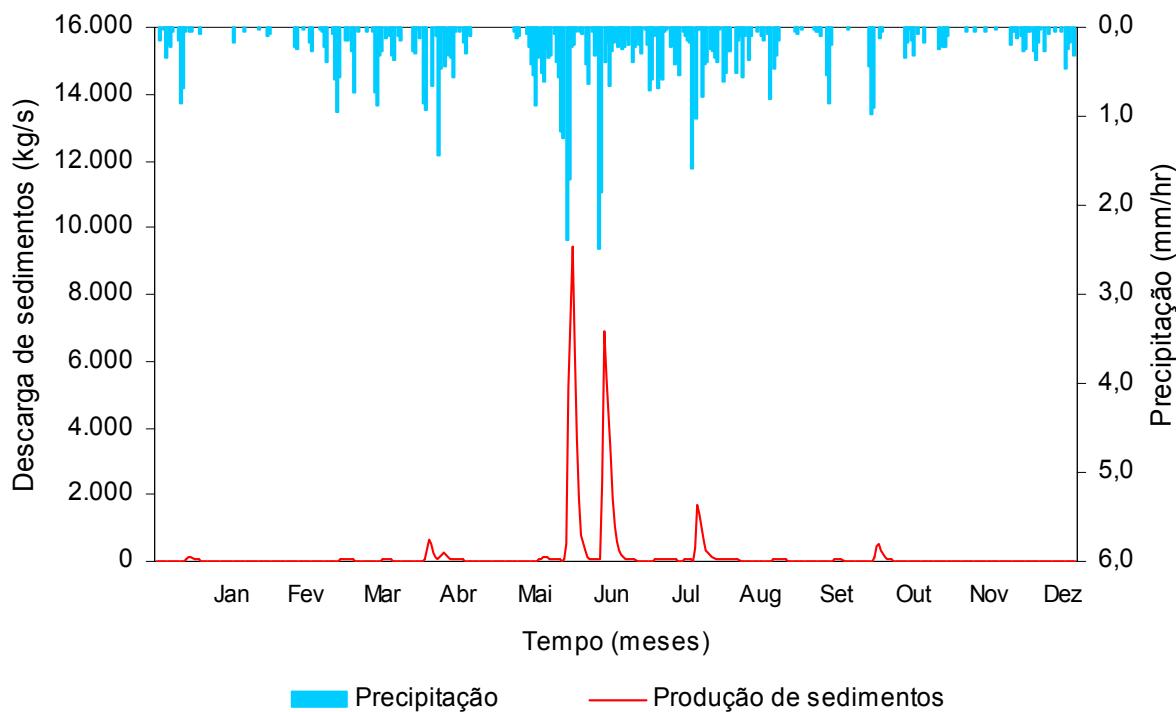


Figura 5.10 - Hietograma observado e sedigrama calculado para o exutório da bacia do rio Pirapama para o ano de 2000.

A Figura 5.11 foi gerada a partir dos valores dos parâmetros do Quadro C.1 do Apêndice C, e da chuva observada para 2000, mostrando as classes que mais contribuem para o assoreamento da barragem Pirapama. Na mesma figura foi calculada a descarga de sedimentos para as classes de sedimentos 0,005; 0,05; 0,25; e 0,5 mm. Percebe-se que a classe 0,05 foi a que mais contribuiu para a descarga de sedimentos na barragem e que em 2001 o período de maior produção foi entre os meses de maio e setembro.

A Tabela 5.11 apresenta a produção total de sedimentos calculada entre 1987 e 2001 para a bacia do rio Pirapama. Percebe-se que os volumes de sedimentos assumiram valores similares para todo o período analisado, com exceção para os anos de 1987, 1993, 1998 e 2001, que apresentaram valores abaixo da média calculada da produção de sedimentos, fato que pode ser explicado levando em consideração que nesses anos foram registrados as menores taxas de chuva na bacia. Os demais anos apresentaram valores próximos à média da produção de sedimentos calculada, com exceção para 2000, que foi considerado um ano dito “chuvisco”, de acordo com os dados observados de pluviometria dos postos da bacia.

Tabela 5.10 - Produção de sedimentos de acordo com o tamanho das partículas para 2000

Tamanho da partícula (mm)	Produção de sedimentos (ton/ha)	Total (%)
0,005	932,94	37,8
0,05	1.067,16	43,2
0,25	455,47	18,4
0,5	14,27	0,6

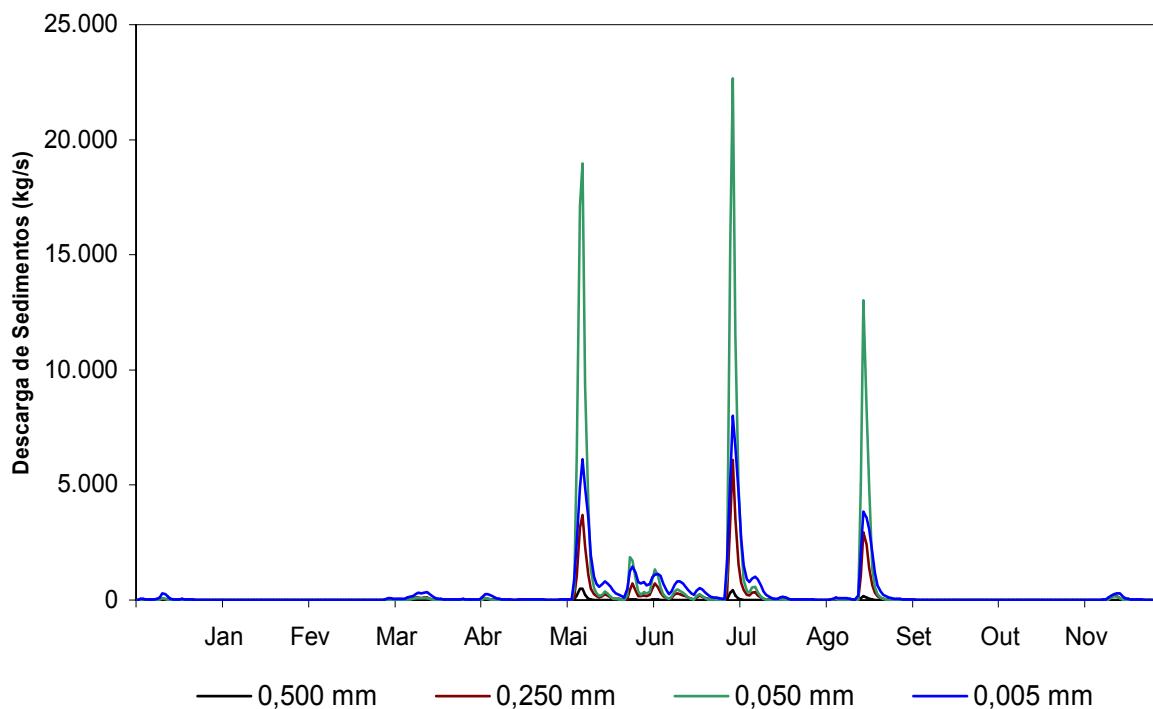


Figura 5.11 - Sedigrama calculado das cinco classes de sedimentos para a barragem Pirapama para 2000.

Tabela 5.11 - Assoreamento Potencial da barragem Pirapama

Anos	Produção de sedimentos (ton/ha/ano)
1987	533,48
1988	1.053,12
1989	703,74
1990	840,34
1991	501,19
1992	1.166,35
1993	328,06
1994	1.058,04
1995	1.158,40
1996	969,04
1997	1.048,26
1998	440,46
1999	592,44
2000	3.317,27
2001	520,71

Não se pretende aqui expor a real situação da bacia Pirapama com relação à produção de sedimentos, mas sim, instigar a realização de outros estudos, além de chamar a atenção das autoridades responsáveis na gestão dos recursos hídricos locais da importância na coleta de dados de sedimentos para o conhecimento hidrossedimentológico da bacia. Dos resultados expostos, conclui-se que o período compreendido entre março e julho apresenta o maior perigo para a bacia, pois nesse período percebe-se um aumento significativo da produção de sedimentos na bacia, quando medidas preventivas poderiam ser adotadas.

### **5.3 Modelagem hidrossedimentológica acoplada a um SIG**

Atualmente, inúmeros estudos de modelagem de vazão e erosão são realizados em diversas bacias hidrográficas, porém, o uso integrado de modelos hidrossedimentológicos distribuídos em um SIG – Sistema de Informações Geográficas, traz significativos avanços para a identificação de áreas susceptíveis ao processo de erosão e das potencialidades hídricas de uma bacia, e vem sendo bastante empregado na área de recursos hídricos (RUFINO et al., 2003, SANTOS et al., 2004a, SANTOS et al., 2005b).

A utilização do acoplamento permite gerar informações de extrema importância com relação aos recursos hídricos, e até mesmo auxiliar na obtenção de dados físicos de uma bacia, refletindo diretamente na qualidade dos resultados gerados pelo modelo, reduzindo assim, o grau de incerteza e aumentando sua eficácia.

Os resultados das simulações hidrossedimentológicas foram implantados num SIG, com o objetivo de identificar a espacialização das potencialidades hídricas e dos locais mais tendenciosos ao processo de erosão. Após o acoplamento dos resultados da modelagem, foram gerados mapas temáticos dos volumes totais das vazões calculadas para as sub-bacias e da produção de sedimentos para cada plano discretizado da bacia do rio Pirapama em 2000, como mostrado nas Figuras 5.12 e 5.13.

A Figura 5.12 apresenta a espacialização das vazões computadas para cada sub-bacia para o ano de 2000, mostrando que as sub-bacias tiveram um comportamento similar no que tange o escoamento superficial, exceto nas sub-bacias Pirapama e Gurjaú, uma vez que nessas sub-bacias estão localizados os principais rios da bacia com relação ao volume de água escoado.

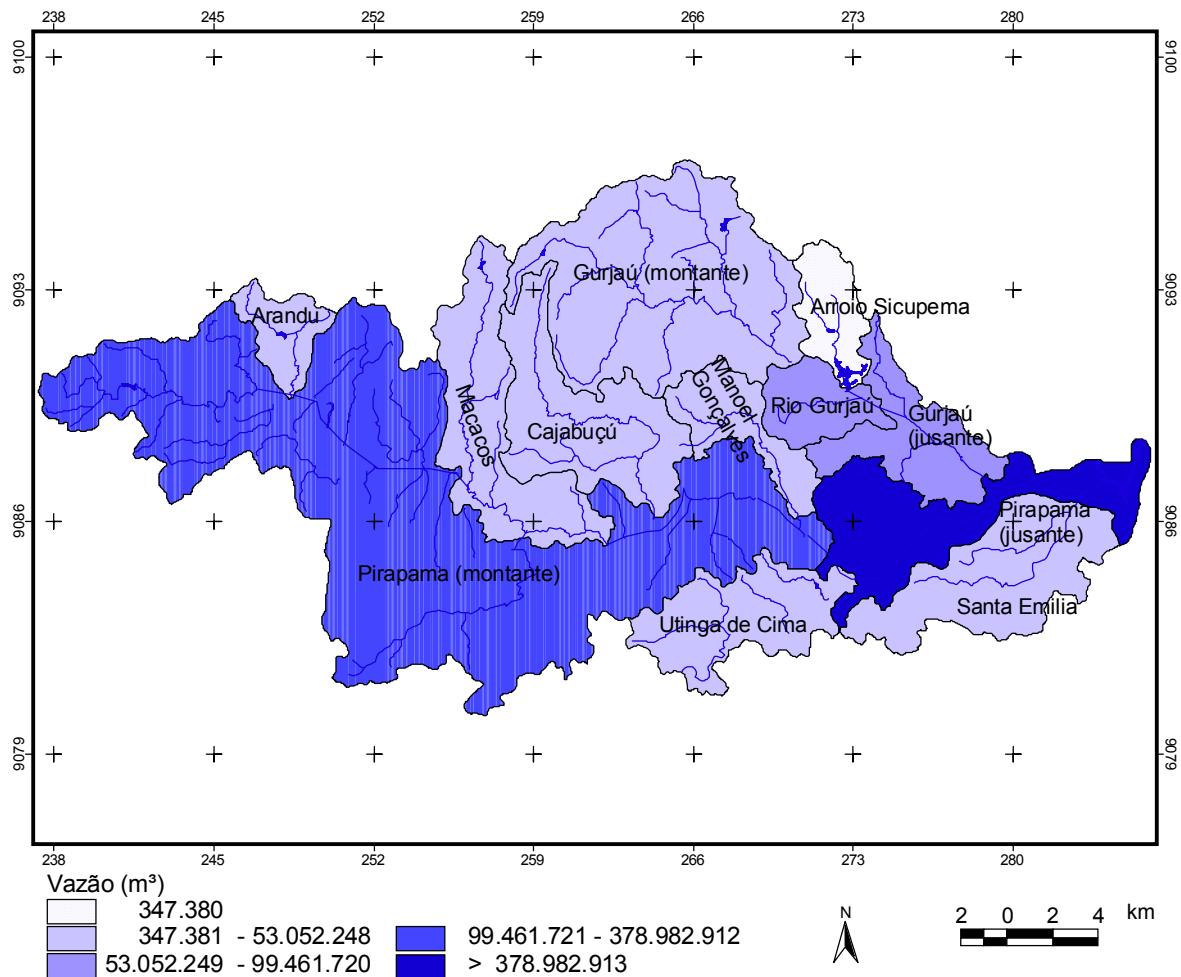


Figura 5.12 - Espacialização da vazão para cada sub-bacia da bacia Pirapama em 2000.

A Figura 5.13 apresenta a espacialização da produção de sedimentos calculada pelo modelo Kineros2 para cada plano discretizado acoplado no SIG. Essa integração entre modelos hidrológicos e o SIG fornece inúmeros benefícios na identificação de áreas susceptíveis ao processo de erosão. A partir do conhecimento espacial das informações geradas pelo modelo hidrológico é possível analisar *in loco* as causas do processo de erosão. A Figura 5.14 mostra que algumas áreas da bacia do rio Pirapama contribuíram com mais de 50.000 toneladas de sedimentos, e que grande parte da bacia, isto é, muitos planos, produzem entre 10.000 a 50.000 toneladas, como calculado para o ano 2000.

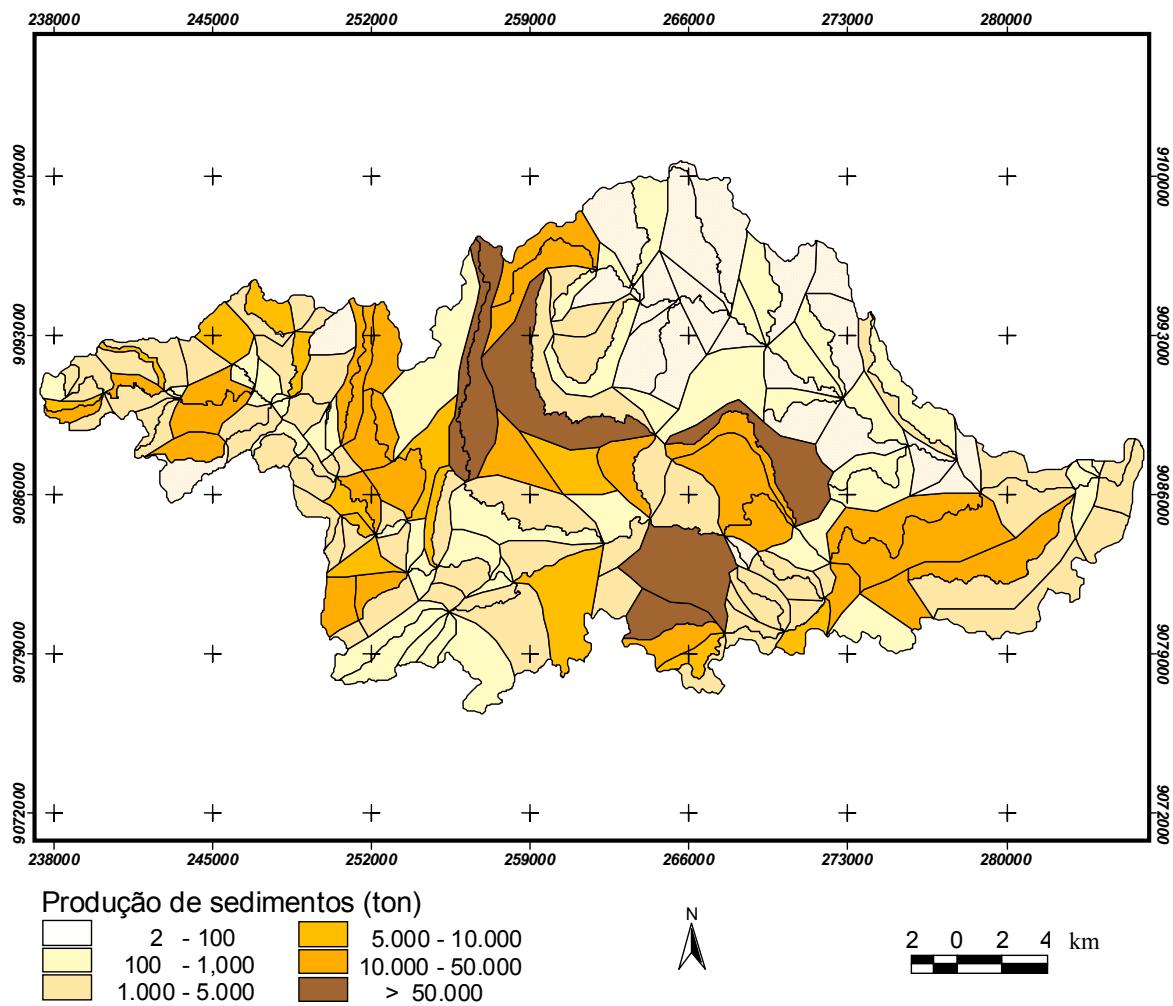


Figura 5.13 - Espacialização da produção de sedimentos para a bacia Pirapama em 2000.

#### 5.4 Aporte de sedimentos no Reservatório Pirapama: resultados e discussões

Os reservatórios urbanos sofrem importantes alterações ambientais uma vez que sua localização facilita a interação antrópica; isto é, as mudanças antrópicas realizadas na cobertura vegetal e nas formas de uso do solo urbano das bacias periurbanas contidas nas grandes metrópoles influenciam diretamente os regimes hidrológicos, hidráulicos, sedimentológicos e de qualidade das suas águas superficiais. Foi então elaborado neste estudo uma estimativa da produção de sedimentos na bacia Pirapama e do aporte de sedimentos na barragem Pirapama.

A barragem Pirapama está localizada na bacia do rio Pirapama, mais precisamente no Município de Cabo de Santo Agostinho com as coordenadas 8° 22' de Latitude Sul e 35° 00' de Longitude Oeste. A barragem Pirapama possui uma capacidade de armazenamento de água

de aproximadamente  $138 \times 10^6 \text{ m}^3$ . Existem outras barragens, como mostradas na Figura 3.2, mas a barragem Pirapama foi escolhida por ser uma das principais fontes de suprimento d'água que abastecem a Região Metropolitana do Recife, chegando a fornecer diariamente cerca de  $6,3 \text{ m}^3/\text{s}$ , e por drenar uma área de  $372 \text{ km}^2$ , 61,29% da área total da bacia.

A Figura 5.14 mostra graficamente a produção de sedimentos carreados para a Barragem Pirapama numa escala anual, onde pode-se observar que no ano 2000 houve uma produção de sedimentos superior a 3.000 ton/ha, e que o volume total de sedimentos carreados para a barragem Pirapama ao longo dos 15 anos de análise, de 1987 e 2001, foi aproximadamente de 14.230,90 ton/ha.

A Figura 5.15 apresenta o hietograma diário observado calculado pelo método de Thiessen e o sedigráma diário calculado para a barragem Pirapama entre 1987 e 2001. Essa figura mostra que o ano de 2000 apresentou uma produção média de sedimentos maior do que os outros anos, atingindo mais de 50.000 kg/s em alguns eventos, mostrando que a bacia está suscetível ao processo de erosão em períodos considerados chuvosos.

A partir da produção de sedimentos calculada entre 1987 a 2001 para a bacia do rio Pirapama, foi avaliado o aporte de sedimentos estimado para a barragem Pirapama, como pode ser conferido na Figura 5.16. Essa figura chama a atenção para o total acumulado de sedimentos na barragem nesse período, onde cerca de mais 14.000 (ton/ha) foram carreadas para o reservatório.

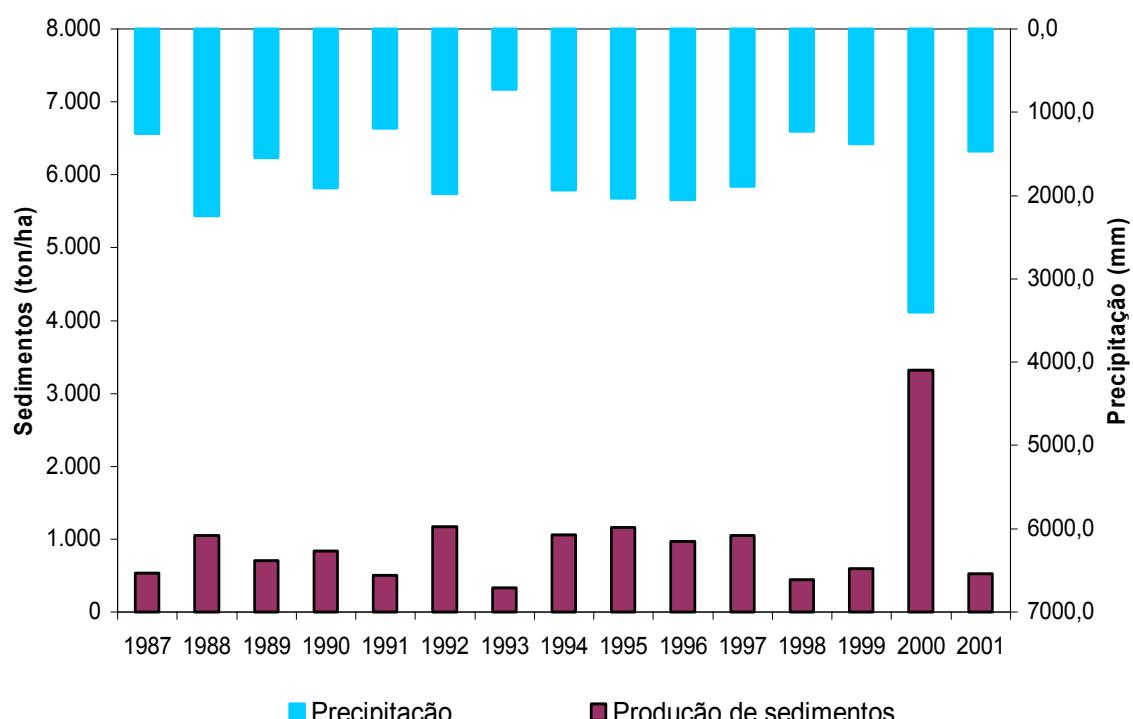


Figura 5.14 - Hietograma anual observado e produção total anual de sedimentos calculado chegando na barragem Pirapama.

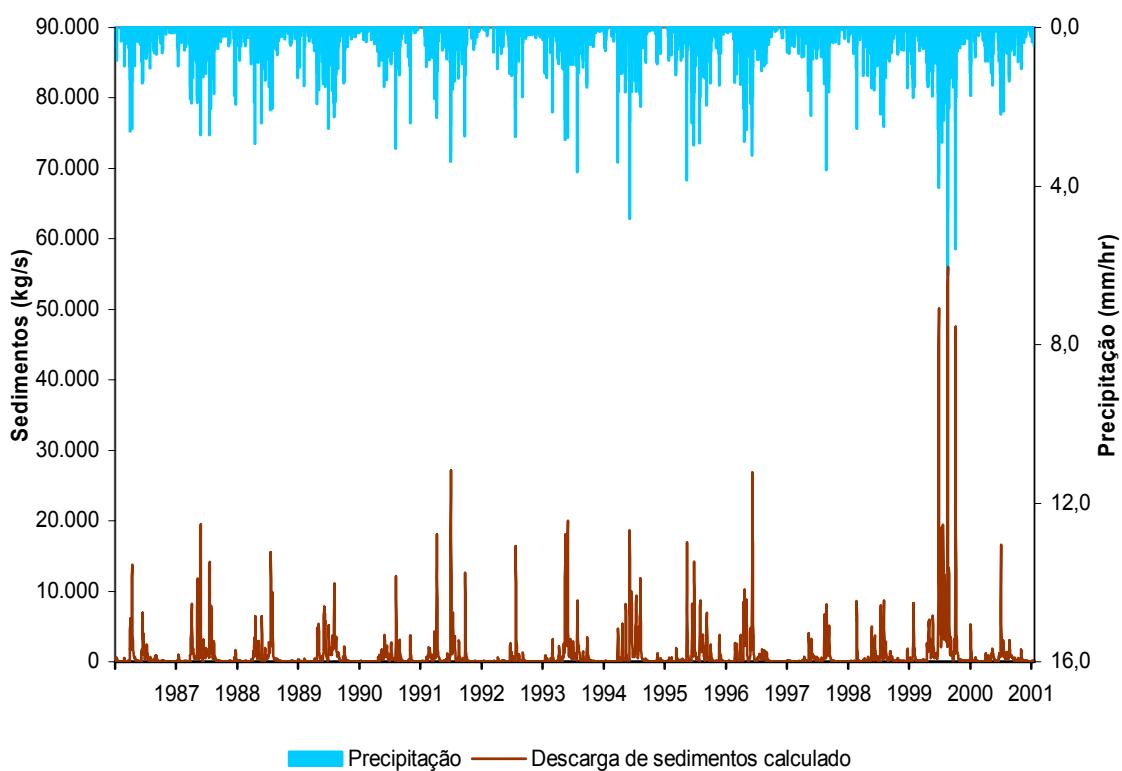


Figura 5.15 - Hietograma médio diário observado e sedigrama diário calculado chegando na barragem Pirapama.

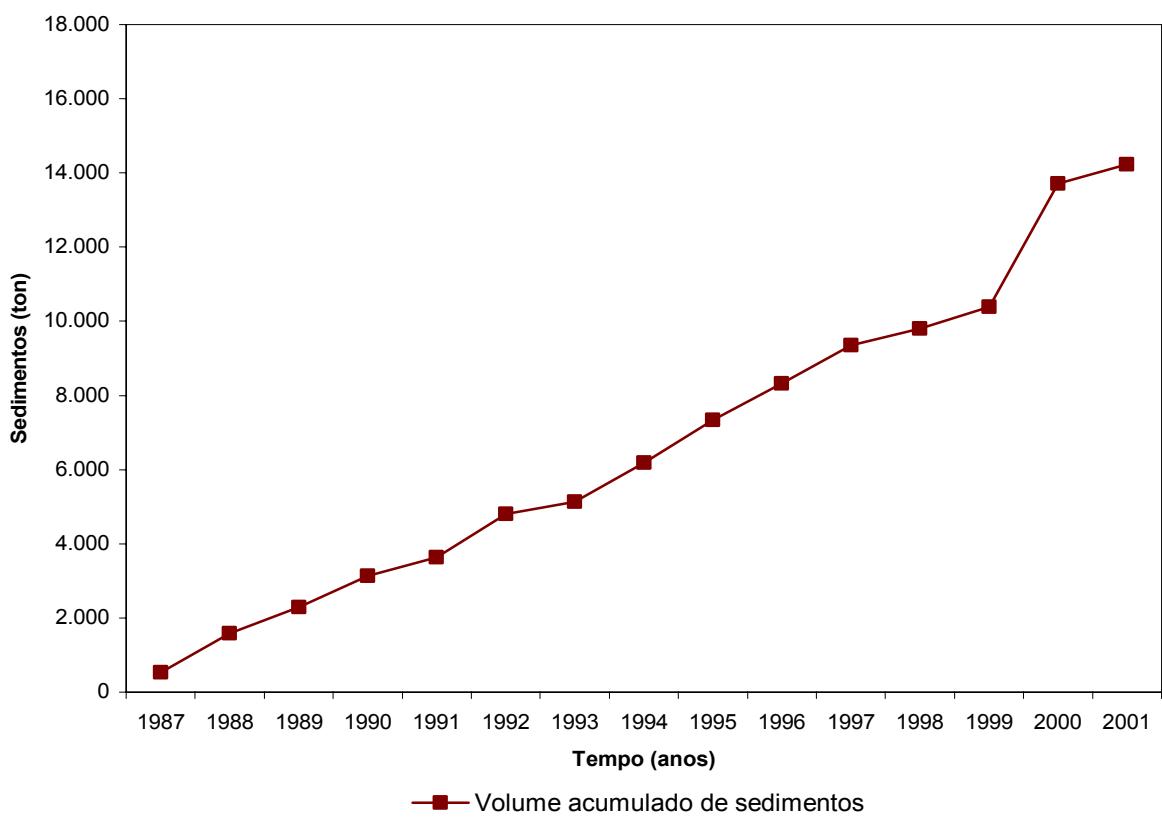


Figura 5.16 - Aporeto de sedimentos calculado para o reservatório Pirapama.

Os resultados das estimativas do aporte de sedimentos no reservatório Pirapama entre 1987 e 2001 apresentados anteriormente, servem de alerta para a tomada de medidas preventivas contra a diminuição potencial da capacidade da barragem Pirapama, uma vez que esse reservatório é um dos principais equipamentos responsáveis pelo provimento de água para o abastecimento humano das cidades de Recife, Jaboatão dos Guararapes, Olinda, Paulista e Cabo de Santo Agostinho.

## **6 PREVISÃO HIDROSEDIMENTOLÓGICA NUMA BACIA PERIURBANA: O ESTUDO DE CASO PIRAPAMA**

### **6.1 Previsão Climática para a Bacia do Rio Pirapama: Metodologia e Resultados**

No presente Capítulo, são apresentados os resultados do acoplamento do modelo de circulação regional RSM com o modelo de circulação global ECHAM em modelos de simulação de vazão e erosão para a bacia do rio Pirapama.

As séries de previsão de precipitação foram geradas a partir da integração do modelo regional RSM com o modelo global ECHAM realizada na FUNCEME – Fundação Cearense de Meteorologia. As séries pluviométricas previstas pelo RSM foram cedidas ao Projeto PRECLIHNE – Previsão Climática e Hidrológica no Nordeste do Brasil, para o cumprimento das metas do projeto, que era integrar o acoplamento entre modelos de previsão climática em modelos hidrológicos por um período de 30 anos. O presente trabalho faz parte do Projeto PRECLIHNE, e utilizou as séries previstas de chuva pelo RSM de 1987 a 2000, como será mostrado a seguir.

#### **6.1.1 Dados de entrada do modelo RSM**

O sistema de previsão regional do clima, utilizado nesta pesquisa, é o implementado pela FUNCEME, em convênio com o IRI – *International Research Institute*, da Universidade

de Columbia nos Estados Unidos, que utiliza o modelo RSM acoplado ao modelo de circulação global atmosférica ECHAM, desenvolvido no *Max Plank Institute*, na Alemanha.

No que tange as informações de entrada do modelo RSM, as coordenadas da área onde será gerada a previsão é a primeira informação necessária para a entrada de dados do modelo. As coordenadas inseridas no modelo onde está inserida a bacia do rio Pirapama, foram 10° e 6,5° de Latitude e 39° e 34° de Longitude.

O modelo necessita da entrada de uma grande série de dados de precipitação observados. Esses dados foram obtidos da rede de postos pluviométricos do INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. O modelo requer também valores para uma série de parâmetros e de condições físicas, como listados na Tabela 6.1, que correspondem às variáveis da superfície, e na Tabela 6.2, onde se encontram os parâmetros do arquivo de fluxo do modelo RSM.

Tabela 6.1 - Variáveis da superfície do modelo RSM

Variáveis	Descrição
<i>tsea</i> *	temperatura da superfície (k) [*sobre a superfície]
<i>smc</i> *	conteúdo úmido do solo (fração)
	smc (*,1): média de 0 a -100mm
	smc (*,2): média de -100 a -2000mm
<i>sheleg</i> *	snoaltura da neve (mm)
<i>stc</i> *	temperatura do solo (k)
	stc (*,1): média de 0 a -100mm
	stc (*,2): média de -100 a -2000mm
<i>tg3</i>	temperatura do solo profundo (k), média de -2.000mm a -4.000mm
<i>zorl</i> *	rugosidade da superfície (mm) [* sobre o oceano]
<i>cv</i> *	cobertura de nuvens
<i>cvb</i> *	altura da base da nuvem
<i>cvt</i> *	altura do topo da nuvem
<i>albed</i>	superfície do albedo (fração, 4 tipos)
<i>slmsk</i>	mascara para o mar, terra e gelo (0 = mar, 1 = terra, e 2 = gelo)
<i>vfrac</i>	cobertura vegetal (fração)
<i>hprime</i>	variância de montanhas
<i>canopy</i> *	conteúdo de água na copas das árvores
<i>f10m</i>	fator para ventos a 10m (usado apenas para assimilação de dados)
<i>vtype</i>	tipo de vegetação
<i>stype</i>	tipo de solo
<i>facalf</i>	angulo zênite dependente da fração
<i>ustar</i> *	velocidade do atrito superficial
<i>fm</i> *	função integrado do perfil para o momento na camada superficial
<i>fh</i> *	função integrado do perfil para o calor e umidade na camada superficial

\* previstas ou estimadas, os outros são obtidas pela climatologia, por dados de observação, ou pelo modelo de previsão global.

Tabela 6.2 - Listagem dos parâmetros do modelo RSM

Variáveis	Descrição
<i>dusfc</i>	fluxo domomento de $u$ médio
<i>dvsfc</i>	média momentânea do fluxo da superfície
<i>dtsfc</i>	fluxo do calor sensível médio na superfície
<i>dqsfc</i>	fluxo do calor latente médio na superfície
<i>tsea</i>	temperatura do oceano
<i>smc</i>	umidade da primeira camada de solo
<i>smc</i>	umidade da segunda camada de solo
<i>stc</i>	temperatura da primeira camada de solo
<i>stc</i>	temperatura da segunda camada de solo
<i>dlwsfc</i>	radiação média de ondas descendentes na superfície
<i>ulwsfc</i>	radiação média de ondas ascendentes na superfície
<i>ulwtoa</i>	radiação média de ondas ascendentes no topo da atmosfera
<i>uswtoa</i>	radiação solar média no topo da atmosfera
<i>uswsfc</i>	radiação solar média ascendente na superfície
<i>dswsfc</i>	radiação solar média descendente na superfície
<i>tcdchcl</i>	cobertura de nuvem total médio para nuvens altas
<i>preshct</i>	pressão do topo da nuvem para nuvens altas
<i>preshcb</i>	pressão da base da nuvem para nuvens altas
<i>tmpht</i>	temperatura do topo das nuvens para nuvens altas
<i>presmct</i>	pressão do topo das nuvens para nuvens médias
<i>presmcb</i>	pressão da base das nuvens para nuvens médias
<i>tmpmct</i>	temperatura do topo das nuvens para nuvens médias
<i>tcdclcl</i>	cobertura total média de nuvens para nuvens baixas
<i>preslct</i>	pressão do topo das nuvens para nuvens baixas
<i>preslcb</i>	pressão da base das nuvens para nuvens baixas
<i>tmplct</i>	temperatura do topo das nuvens para nuvens baixas
<i>geshem</i>	precipitação total média
<i>bengsh</i>	precipitação convectiva média
<i>gflux</i>	fluxo total médio na terra
<i>slmsep</i>	máscara para oceano e terra
<i>slmsep</i>	máscara para gelo
<i>u10</i>	velocidade $u$ do vento
<i>v10</i>	velocidade $v$ do vento
<i>t2</i>	temperatura a 2 metros
<i>q2</i>	umidade específica a 2 metros
<i>psurf</i>	pressão da superfície do solo
<i>tmpmax</i>	valor máximo de <i>t2</i> durante a integração
<i>tmpmin</i>	valor mínimo de <i>t2</i> durante a integração
<i>runoff</i>	vazão
<i>ep</i>	média da evaporação na superfície
<i>pwat</i>	água precipitável
<i>tcldc</i>	total da cobertura de nuvens
<i>eldwrk</i>	função de trabalho das nuvens médias
<i>dvgwd</i>	fluxo médio da ação da gravidade para $u$
<i>cldwrk</i>	fluxo médio da ação da gravidade para $v$
<i>albed</i>	albedo

Após a parametrização do modelo RSM, foram geradas 10 séries de dados de previsão climática para cada ano pela FUNCEME, e disponibilizadas para o Projeto PRECLIHNE. Essas 10 séries de dados correspondem a diferentes condições de contorno dos parâmetros do modelo RSM, isto é, cada parâmetro recebeu um valor diferente antes de cada execução do modelo, com uma resolução de recobrimento horizontal de  $40\text{ km} \times 40\text{ km}$  com dezoito níveis na vertical acoplado dentro do modelo global. Essas séries geradas pelo RSM utilizadas neste trabalho correspondem aos seis primeiros meses de 1987 a 2000.

No RSM, os cálculos da física da superfície são executados usando duas camadas de solo do modelo de Pan e Mahrt (1987) com um tipo de solo entre areia e argila. O modelo com duas camadas de solo é utilizado para descrever melhor o papel da interação entre a vegetação e a umidade do solo e suas trocas de vapor d'água e energia. O tipo de vegetação da área de domínio do modelo regional foi considerado como sendo 70% de savana (GALVÃO et al., 2005).

As 10 séries de dados gerados pelo RSM foram então extraídas uma a uma para as mesmas coordenadas dos postos pluviométricos Pombos, Engenho Cachoeirinha e Pirapama a partir da interpolação das coordenadas em graus decimais dos postos pluviométricos citados acima numa grade de  $40\text{ km} \times 40\text{ km}$ . As coordenadas dos postos estão contidas na Tabela 6.3. Estes postos foram escolhidos por possuírem as séries mais longas de dados pluviométricos, de 1987 a 2001.

Tabela 6.3 - Postos pluviométricos selecionados na bacia do rio Pirapama

Nome do Posto	Longitude	Latitude
Pirapama	-35,0633	-8,2791
Engenho Cachoeirinha	-35,2769	-8,2255
Pombos	-35,3997	-8,1408

## 6.2 Previsão de Vazão para a Bacia do Rio Pirapama

Para a realização da previsão de vazão, foram utilizados os dados de precipitação das dez séries previstas pelo RSM para os seis primeiros meses de 1987 a 2000. Essas séries foram inseridas nos modelos hidrológicos Açumod e Kineros2, já calibrados, conforme mostrados no Capítulo 4. Esse período foi escolhido para a realização das previsões de vazões porque coincide com a maior série de dados observados de vazão na bacia obtida no posto Pirapama, o único ponto de coleta de dados fluviométricos com informações para esse

período. A seguir são mostrados os resultados das previsões de vazão a partir dos modelos hidrológicos Açumod e Kineros2, para o período de 1987 a 2000.

### 6.2.1 Aplicação do modelo Açumod

O modelo Açumod foi aplicado com o objetivo de simular a geração de vazão a partir dos dados pluviométricos previstos para os postos pluviométricos Pombos, Engenho Cachoeirinha e Pirapama. Para isso, foi calculada a média diária das dez séries de dados de previsão do RSM para cada posto, gerando, assim, uma nova série sintética que foi utilizada nas simulações do modelo Açumod, de 1987 a 2000, de janeiro a junho, e o restante dos dados diários de cada ano, de julho a dezembro, foram considerados igual a zero para os dias restantes de cada ano, uma vez que o modelo Açumod é do tipo contínuo.

A Figura 6.1 apresenta o hietograma previsto e os hidrogramas observado e calculado a partir desta precipitação média diária calculada com os dados do modelo RSM. Os indicadores de qualidade da validação dessa simulação são mostrados na Tabela 6.4, de onde pode-se observar que o volume calculado pelo modelo Açumod foi 9,87% superior ao observado para o posto Pirapama de janeiro de 1987 a dezembro de 1994, e que a correlação obtida pelo processo de validação foi de 0,61.

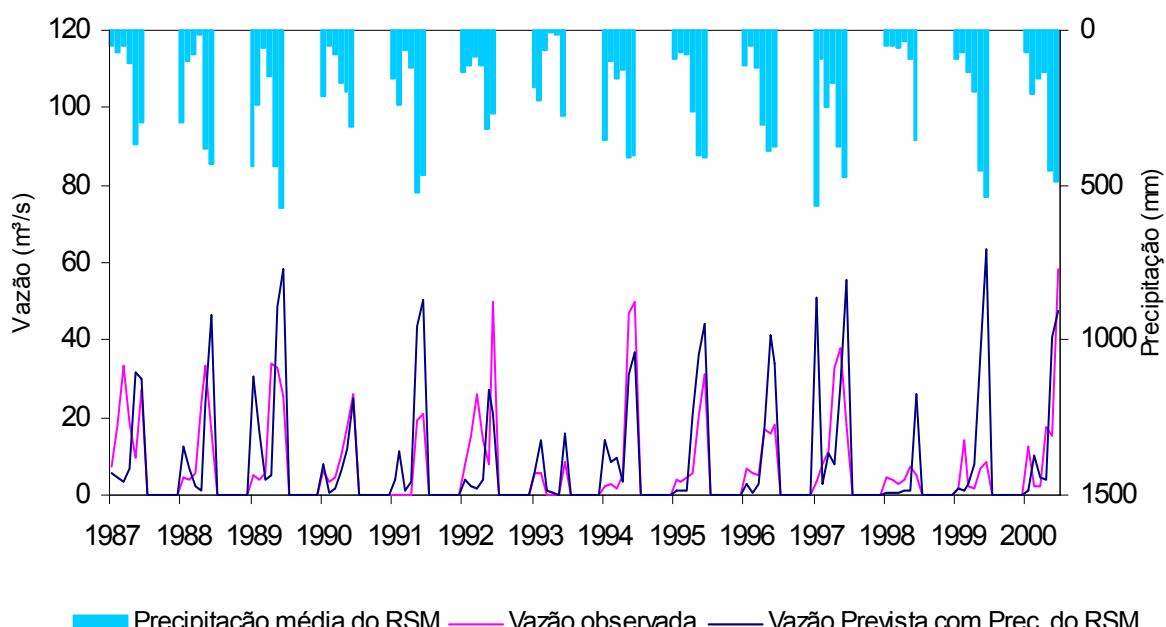


Figura 6.1 - Hietograma médio calculado a partir da previsão do RSM e hidrogramas observado e calculado pelo Açumod para o período de 1987 a 2000.

Tabela 6.4 - Indicadores de qualidade da validação do modelo Açumod

Indicadores	Vazão calculada com a precipitação prevista (m <sup>3</sup> )	Vazão observada (m <sup>3</sup> )
Volume (m <sup>3</sup> )	93.720.672	123.779.232
Média (m <sup>3</sup> /s)	6,69	8,84
Diferença (%)		9,87
Correlação (R)		0,61

## 6.2.2 Aplicação do modelo Kineros2

Para a modelagem da previsão de vazão também foi utilizado o modelo Kineros2. Para tanto, foram realizadas 140 conversões de chuva em vazão a partir dos dados de precipitação previstos pelo RSM. Essas 140 simulações de vazão, foram obtidas a partir de 10 execuções do modelo Kineros2, para cada uma das 10 séries de dados previstos pelo RSM, para os mesmos 14 anos da série observada de vazão, de 1987 a 2000.

Foram calculadas as médias das vazões sazonais, de janeiro a junho, para o mesmo período. As Figuras 6.2. a 6.14, apresentam a comparação entre os resultados das médias diárias das vazões calculadas, e os valores observados de vazão no posto Pirapama, além do hietograma médio previsto na bacia pelo RSM calculado a partir do método de Thiessen.

Para se analisar os resultados das previsões hidrológicas obtidas no presente trabalho, é preciso entender que o ponto principal na análise deve ser direcionado para a tendência da vazão calculada a partir dos dados de chuva previstos em todo o período sazonal, pois os modelos climáticos ainda não conseguem representar com precisão a previsão climática diária com relação a observada, devido a inúmeros fatores, como, por exemplo, as incertezas dos modelos climáticos, e o espaçamento da malha de pontos do modelo.

A Figura 6.2 apresenta a comparação entre a vazão observada diária e a calculada para o posto Pirapama em 1987. A comparação para 1987 mostrou que o volume de vazão diária calculada foi de 29,97 m<sup>3</sup>/s, enquanto o observado apresentou uma média de 19,13 m<sup>3</sup>/s.

A Figura 6.3 apresenta a comparação entre a vazão observada diária e a calculada para o posto Pirapama em 1988. Observa-se no gráfico que os períodos de grande escoamento a partir da chuva prevista pelo RSM, foram bem representados.

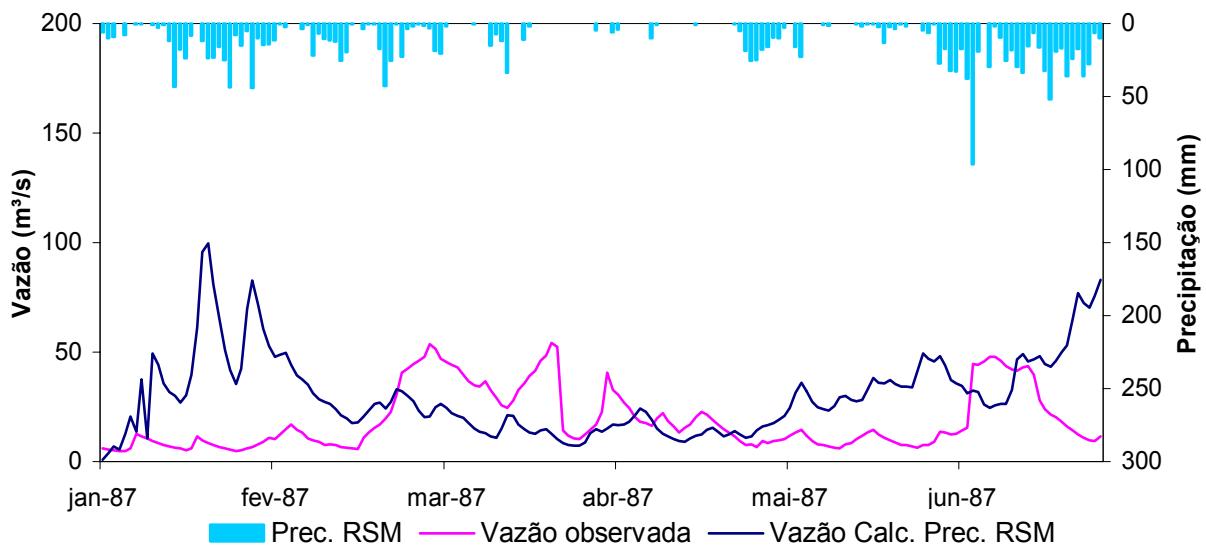


Figura 6.2 - Hietograma médio calculado a partir da previsão do RSM e os hidrogramas observado e calculado pelo Kineros2 para o posto Pirapama a partir da média da precipitação prevista pelo RSM para 1987.

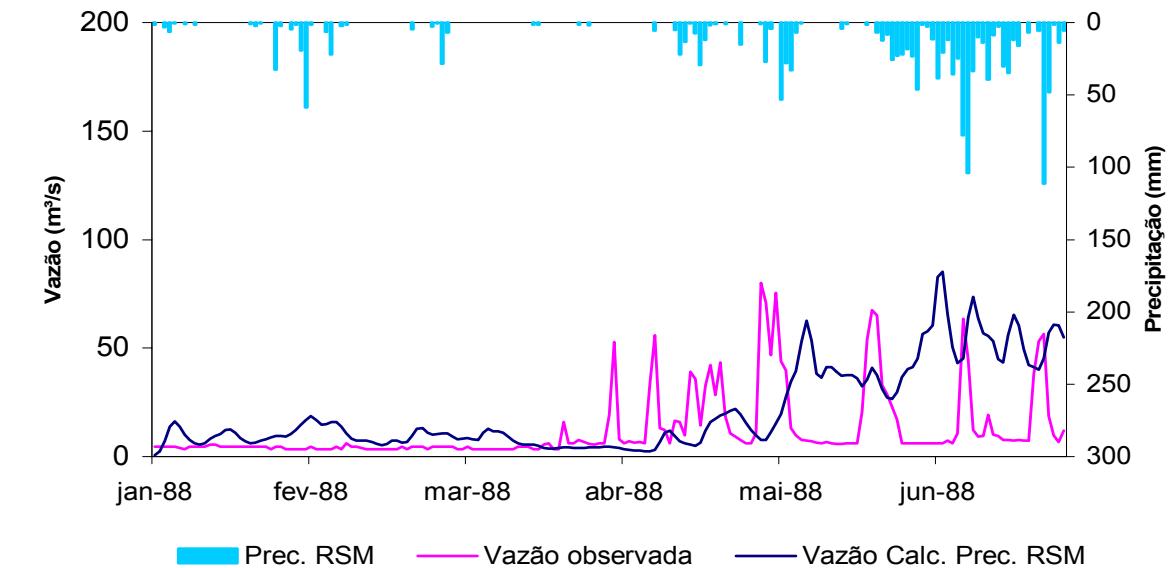


Figura 6.3 - Hietograma médio calculado a partir da previsão do RSM e os hidrogramas observado e calculado pelo Kineros2 para o posto Pirapama a partir da média da precipitação prevista pelo RSM para 1988.

A comparação entre a vazão média calculada para 1989 a partir dos dados de precipitação gerados pelo RSM, e os valores observados no posto Pirapama é mostrada na

Figura 6.4, onde percebe-se uma boa representação do período do aumento do escoamento na bacia. Já as Figura 6.5, 6.6 e 6.7, mostram a comparação entre a vazão média calculada e os valores observados de fluiometria no posto Pirapama, para 1990, 1991 e 1992, respectivamente. As simulações nesses três anos foram satisfatórias, pois apresentaram os melhores ajustes entre as vazões calculadas e as observadas.

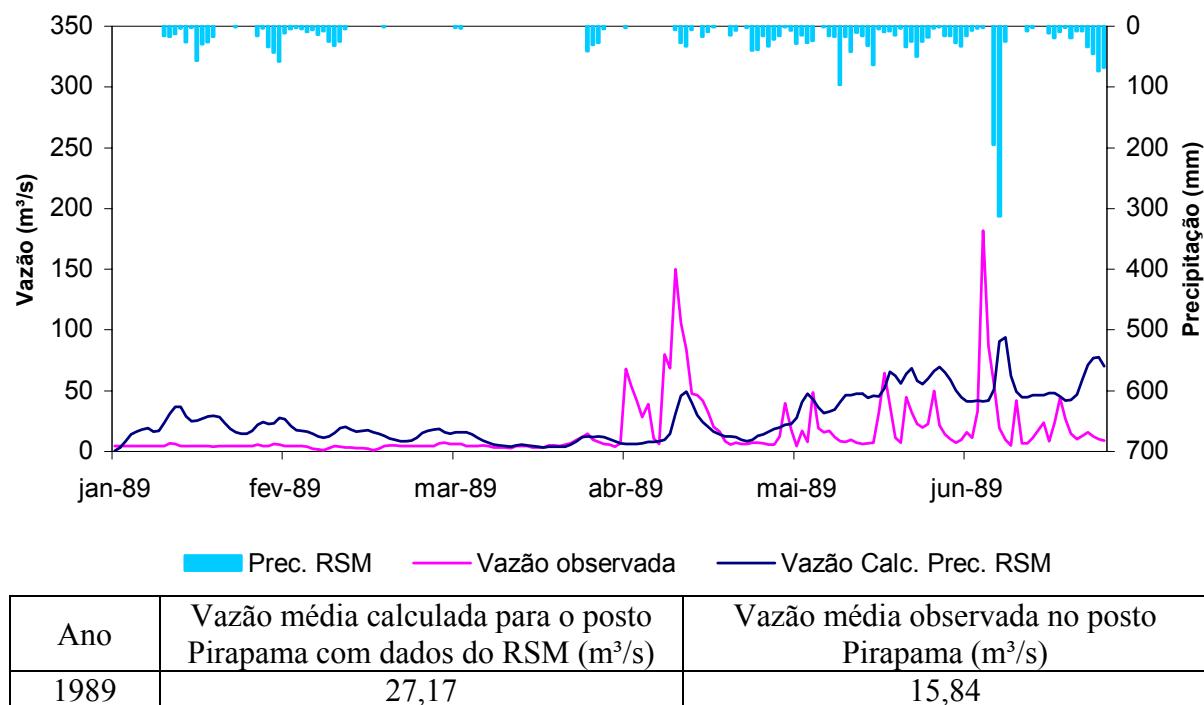


Figura 6.4 - Hietograma médio calculado a partir da previsão do RSM e os hidrogramas observado e calculado pelo Kineros2 para o posto Pirapama a partir da média da precipitação prevista pelo RSM para 1989.

As Figuras 6.13 e 6.14 mostram as vazões calculadas e as observadas para os anos de 1998 e 1999, respectivamente, onde podem ser conferidas as diferenças entre as vazões médias observadas e as calculadas para esses dois anos. Para 1998, o modelo apresentou uma pequena diferença entre a média da vazão calculada,  $5,87 \text{ m}^3/\text{s}$ , e a observada,  $2,24 \text{ m}^3/\text{s}$ , para o posto Pirapama. Para 1999, constatou-se que houve uma grande diferença entre as vazões calculada e observada. Essa variação pode ser explicada por dois motivos, um deles seria que no biênio 1998-1999 houve um longo período de seca em toda a região Nordeste, inclusive na bacia do rio Pirapama, no qual o modelo de previsão climática não foi capaz de prever as condições climatológicas observadas entre 1998 e 1999. Outro fator que pode explicar essa disparidade nos resultados, pode ser atribuído ao início da construção da barragem Pirapama no final de 1998, o que levou o represamento do rio Pirapama, influenciando, assim, nas descargas naturais de vazão coletadas no posto Pirapama de 1998 em diante. A Figura 6.15 mostra a comparação entre as vazões calculada e observada para o posto Pirapama em 2000.

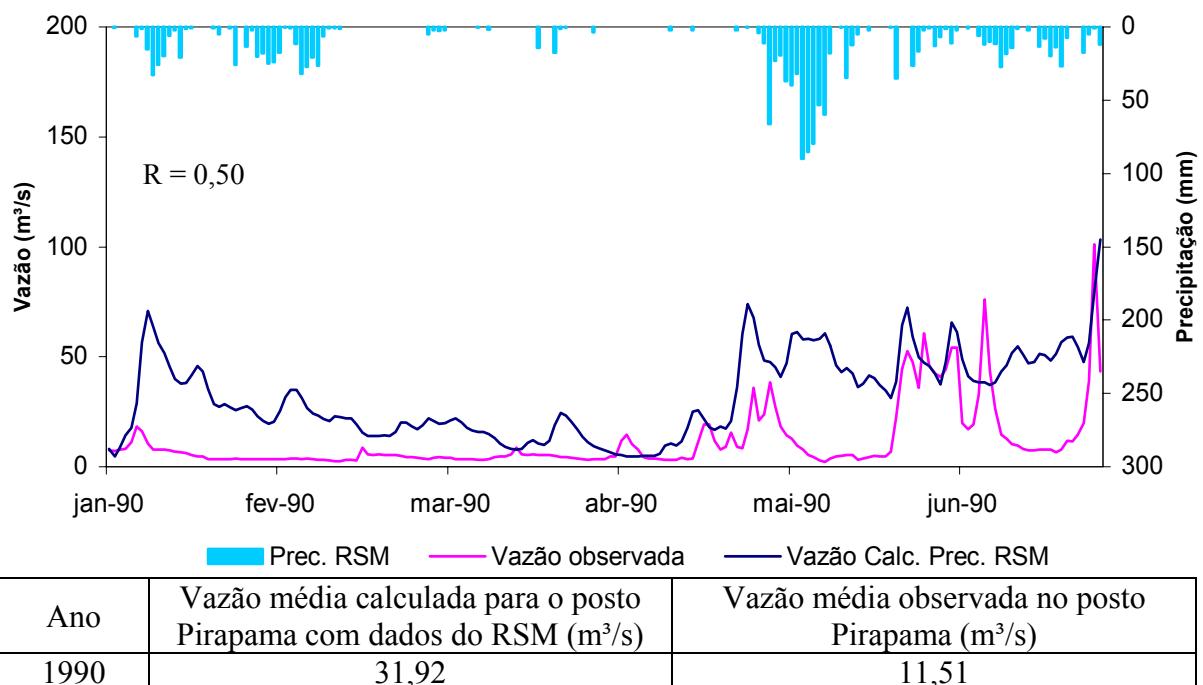


Figura 6.5 - Hietograma médio calculado a partir da previsão do RSM e os hidrogramas observado e calculado pelo Kineros2 para o posto Pirapama a partir da média da precipitação prevista pelo RSM para 1990.

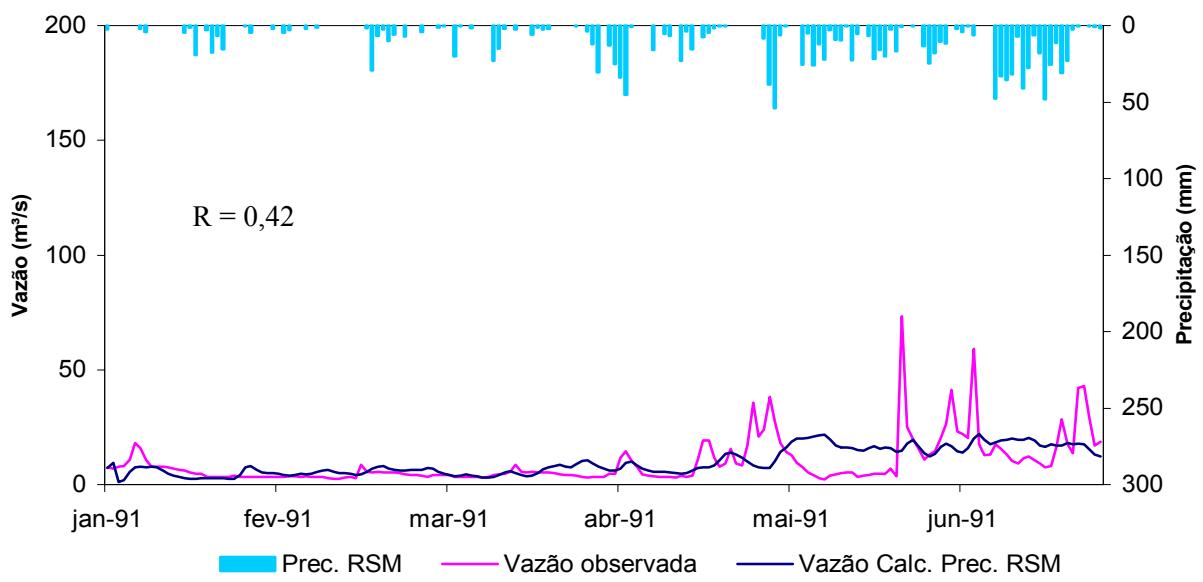
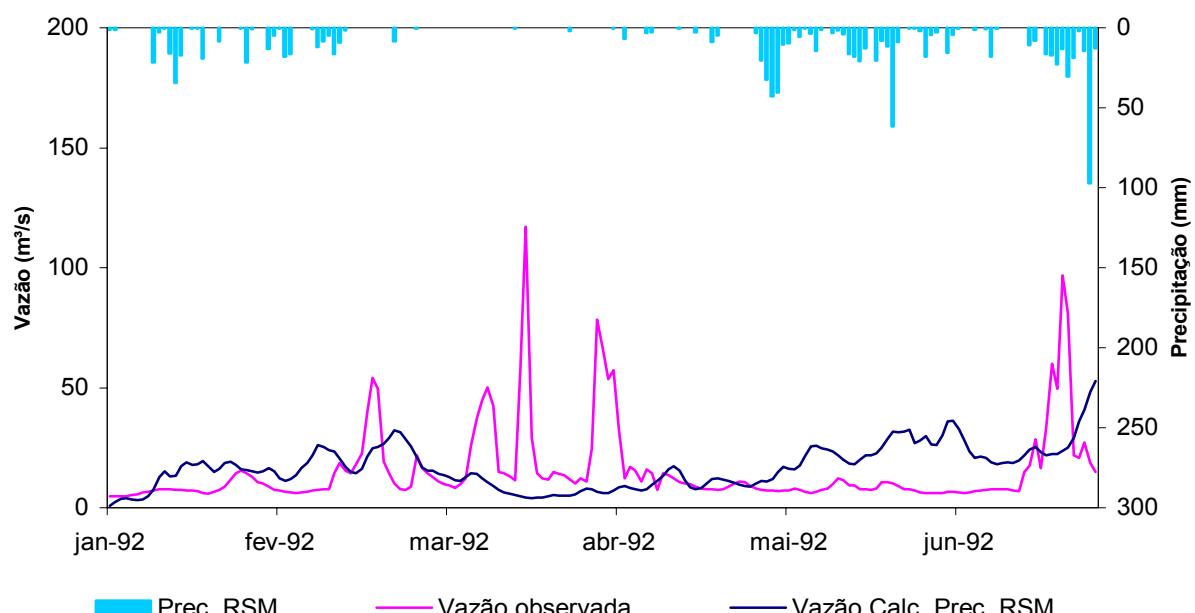


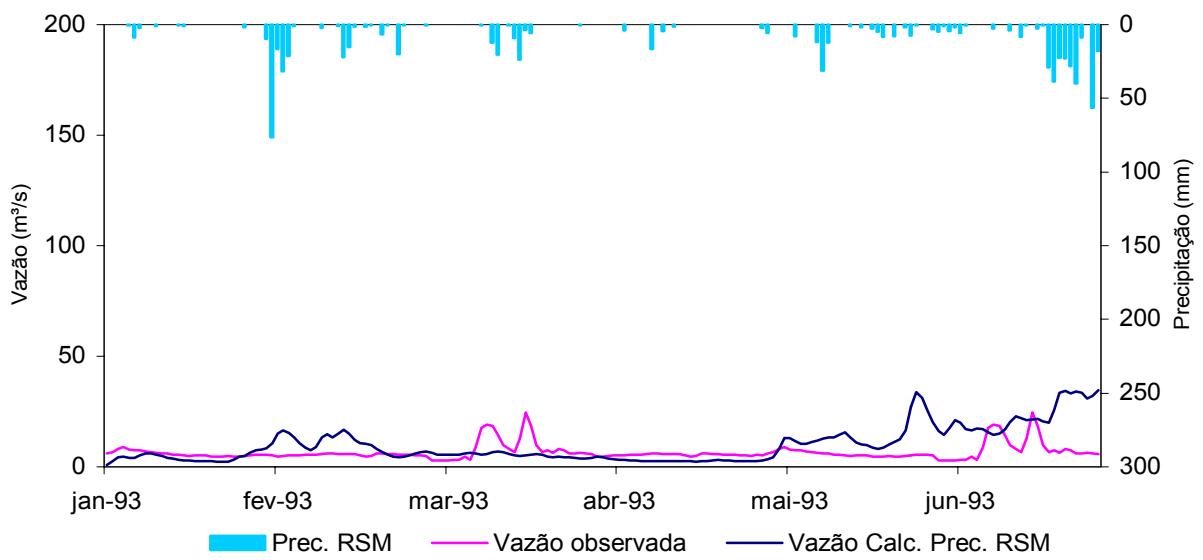
Figura 6.6 - Hietograma médio calculado a partir da previsão do RSM e os hidrogramas observado e calculado pelo Kineros2 para o posto Pirapama a partir da média da precipitação prevista pelo RSM para 1991.

A simulação da comparação da vazão calculada e da observada no posto Pirapama, de janeiro a junho de 1993 (Figura 6.8.), mostrou que os resultados obtidos foram satisfatórios, pois a média entre as vazões calculadas e os valores observados ficaram muito próximos. As Figuras 6.9 a 6.12 apresentam a comparação entre as vazões observadas e as calculadas entre 1994 e 1997. Nesse período as vazões médias calculadas a partir dos dados previstos pelo RSM foram capazes de simular aceitavelmente o período do aumento do escoamento na bacia Pirapama entre os meses de maio a junho de 1994 a 1997.



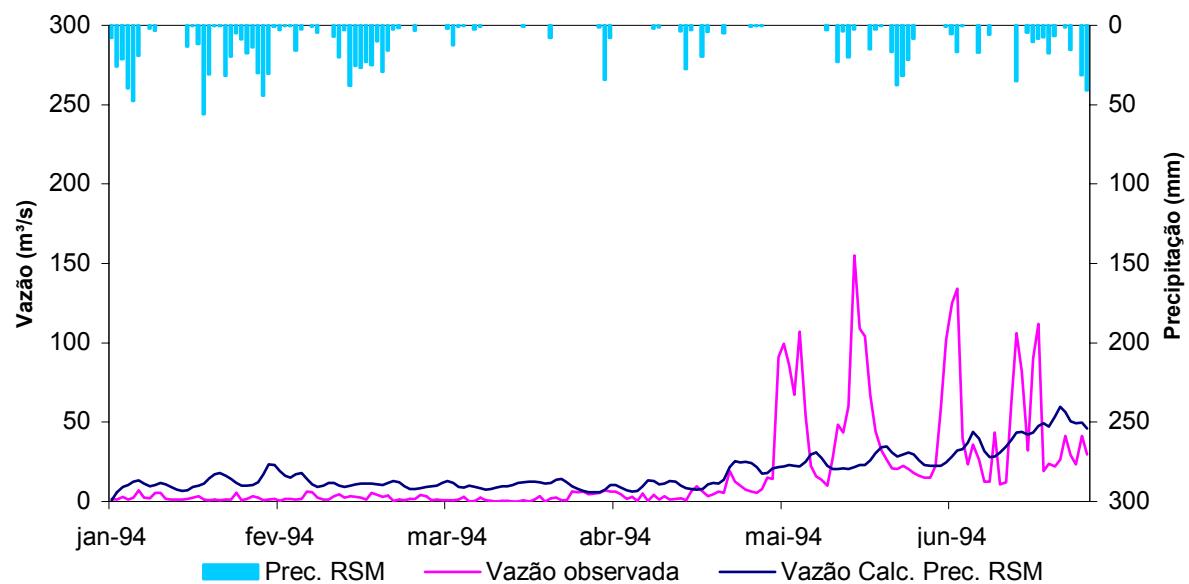
Ano	Vazão média calculada para o posto Pirapama com dados do RSM (m <sup>3</sup> /s)	Vazão média observada no posto Pirapama (m <sup>3</sup> /s)
1992	16,85	15,48

Figura 6.7 - Hietograma médio calculado a partir da previsão do RSM e os hidrogramas observado e calculado pelo Kineros2 para o posto Pirapama a partir da média da precipitação prevista pelo RSM para 1992.

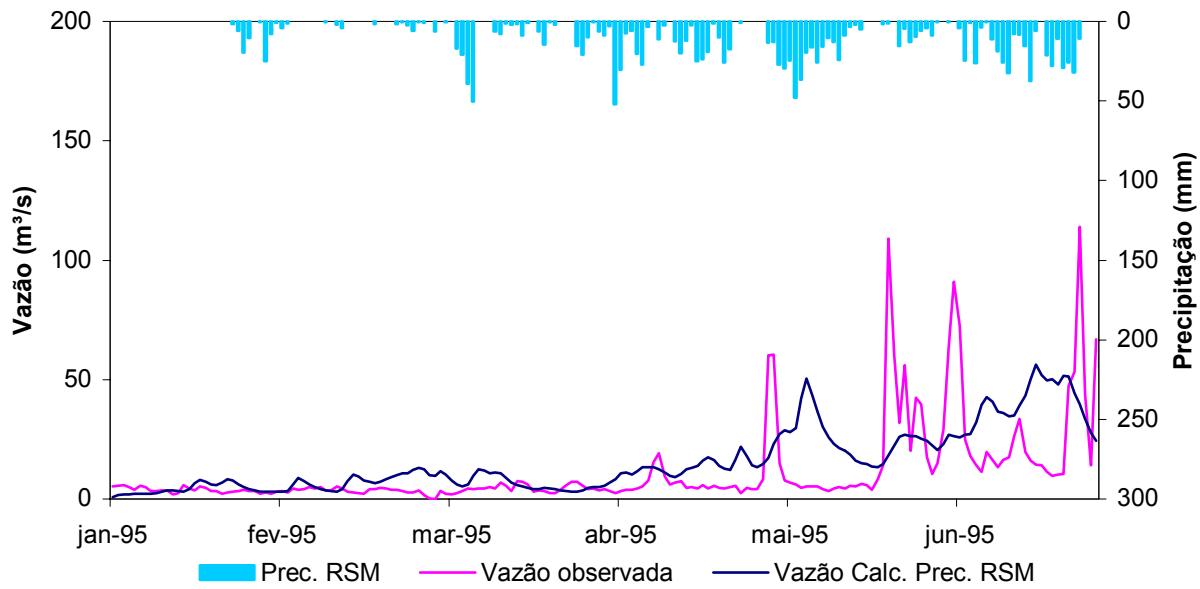


Ano	Vazão média calculada para o posto Pirapama com dados do RSM ( $m^3/s$ )	Vazão média observada no posto Pirapama ( $m^3/s$ )
1993	9,86	6,70

Figura 6.8 - Hietograma médio calculado a partir da previsão do RSM e os hidrogramas observado e calculado pelo Kineros2 para o posto Pirapama a partir da média da precipitação prevista pelo RSM para 1993.

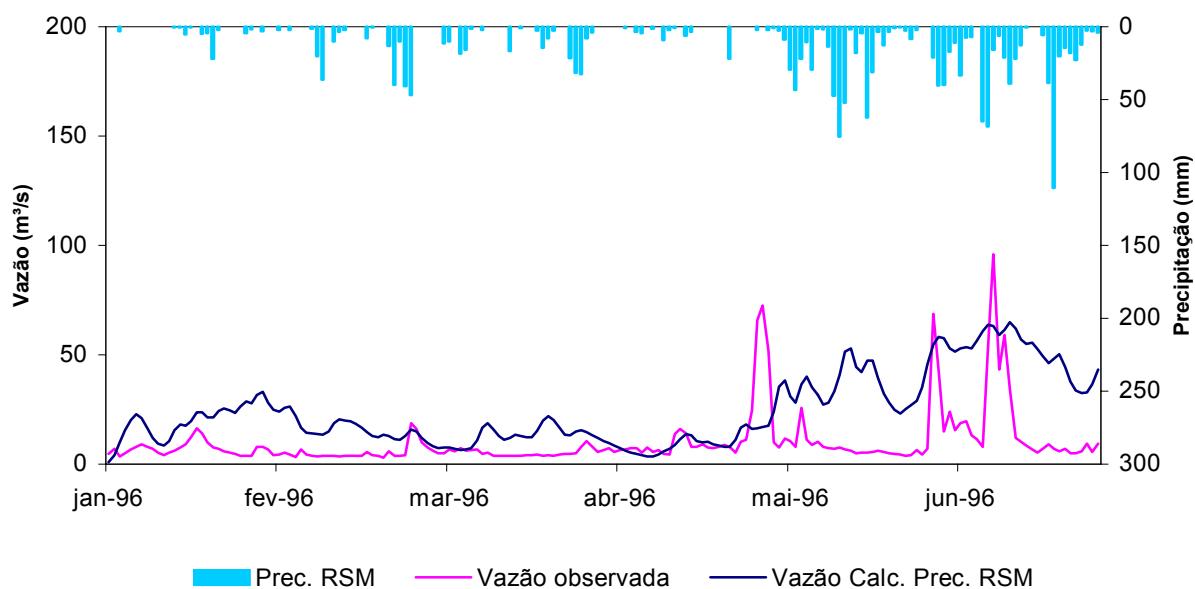


Ano	Vazão média calculada para o posto Pirapama com dados do RSM ( $m^3/s$ )	Vazão média observada no posto Pirapama ( $m^3/s$ )
1994	18,58	17,91



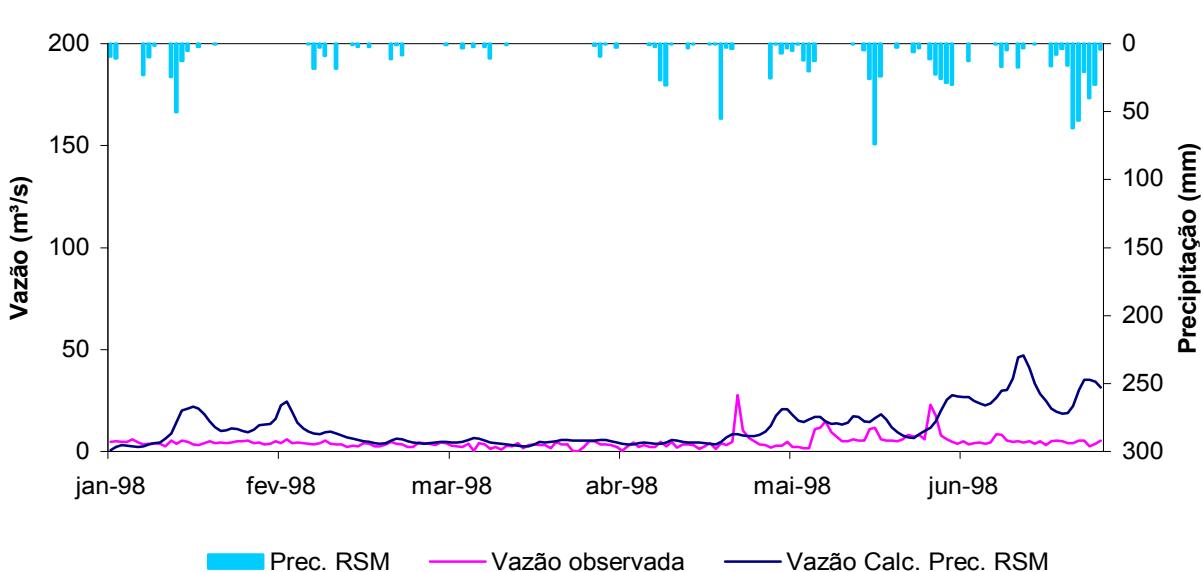
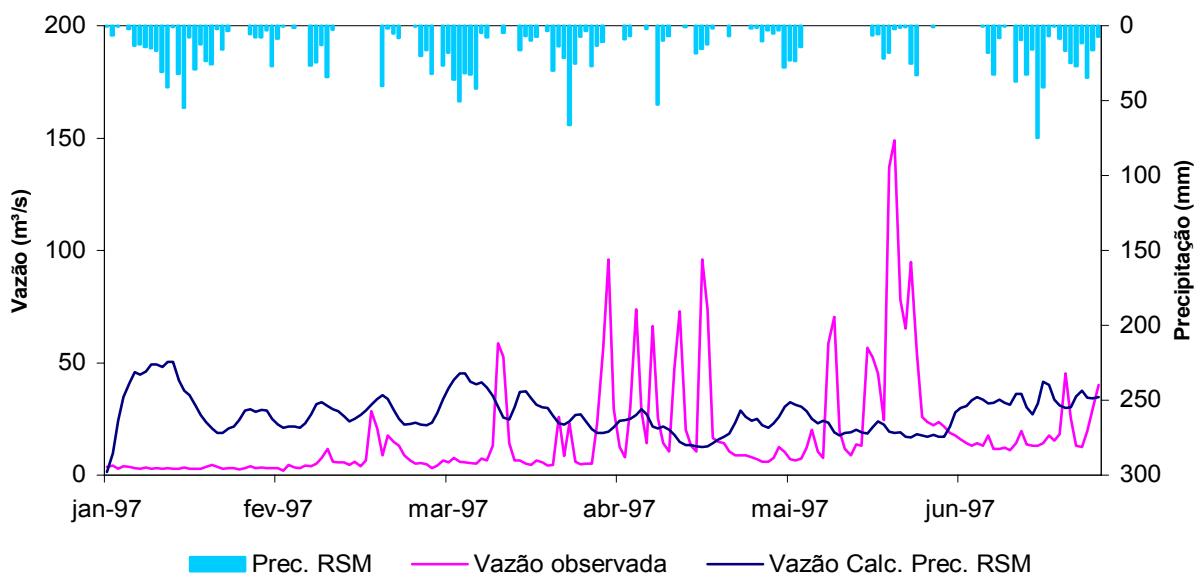
Ano	Vazão média calculada para o posto Pirapama com dados do RSM (m³/s)	Vazão média observada no posto Pirapama (m³/s)
1995	15,75	11,62

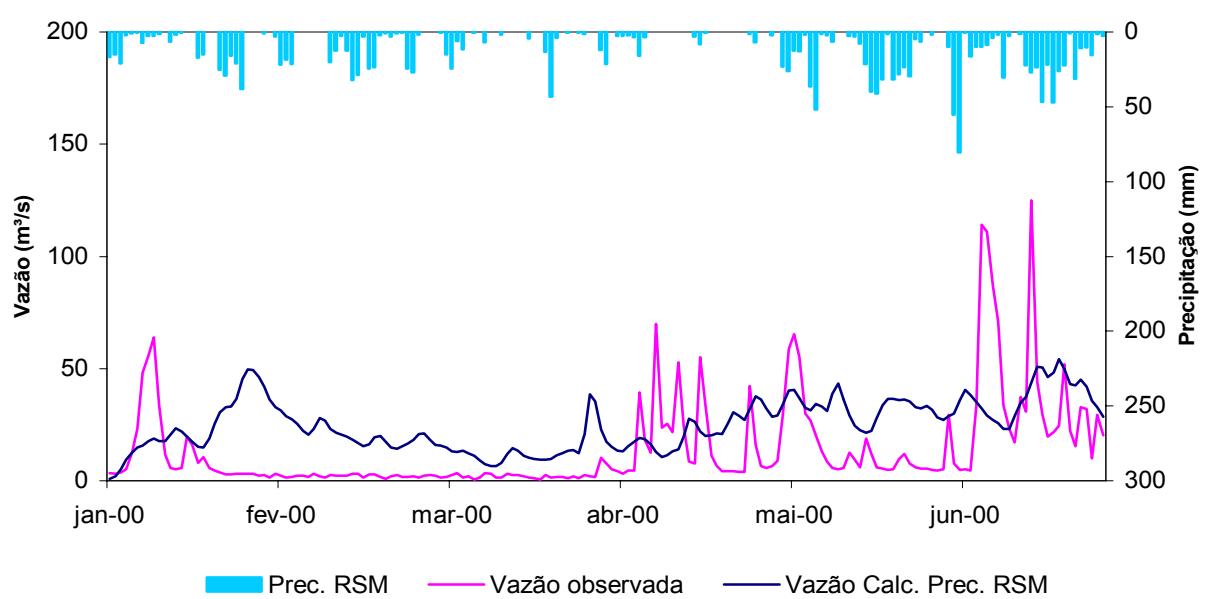
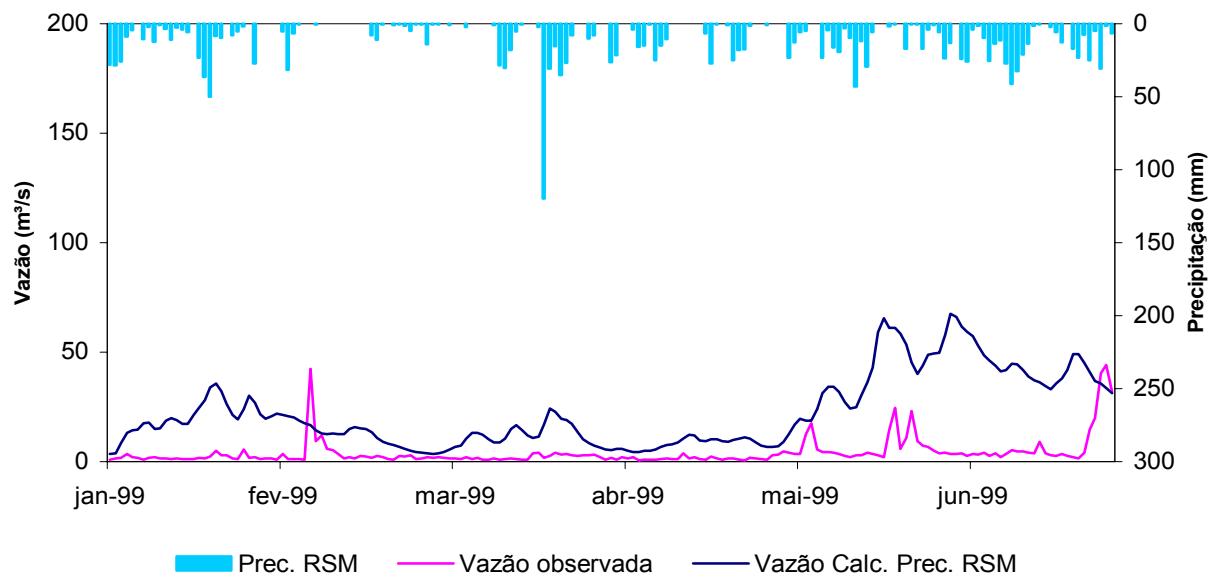
Figura 6.10 - Hietograma médio calculado a partir da previsão do RSM e os hidrogramas observado e calculado pelo Kineros2 para o posto Pirapama a partir da média da precipitação prevista pelo RSM para 1995.



Ano	Vazão média calculada para o posto Pirapama com dados do RSM (m³/s)	Vazão média observada no posto Pirapama (m³/s)
1996	11,99	4,98

Figura 6.11 - Hietograma médio calculado a partir da previsão do RSM e os hidrogramas observado e calculado pelo Kineros2 para o posto Pirapama a partir da média da precipitação prevista pelo RSM para 1996.





### 6.3 Previsão da Produção de Sedimentos na Bacia do Rio Pirapama

O modelo hidrossedimentológico Kineros2 foi usado para gerar a produção de sedimentos para os seis primeiros meses entre os anos de 1987 e 2000. Os valores dos parâmetros do modelo para cada elemento discretizado foram os mesmos apresentados no Capítulo 5, e estão contidos no Apêndice C.

Foi calculada a descarga diária de sedimentos produzidos na bacia com a precipitação prevista pelo modelo RSM, e comparada com os resultados das simulações da produção de sedimentos geradas a partir da precipitação observada, para se ter idéia da resposta do modelo a partir da comparação da erosão calculada pelos dados previstos e os observados de precipitação, para se avaliar o comportamento da produção de sedimentos durante os meses de janeiro a junho, de 1987 a 2000.

As Figuras E.1 a E.14 no Apêndice E, mostram as comparações entre a média diária da produção de sedimentos calculada pelo modelo Kineros2 usando a precipitação prevista pelo RSM, e a calculada a partir da precipitação observada, de janeiro a junho de 1987 a 2000.

A Figura 6.16 apresenta os resultados da média anual de sedimentos obtidos das dez séries dos dados previstos pelo RSM para os seis primeiros meses de cada ano. As simulações da erosão calculadas a partir dos dados de precipitação gerados pelo RSM, foram comparadas aos resultados das simulações da produção de sedimentos geradas a partir da precipitação observada, onde percebe-se que os totais calculados para os anos de 1992, 1994, 1995 e 2000 foram maiores do que os totais calculados a partir dos dados de chuva previstos pelo RSM, enquanto nos demais anos a produção de sedimentos a partir dos dados previstos foi maior do que a calculada com os dados observados.

### 6.4 Previsão do Aporte de Sedimentos no Reservatório Pirapama

A partir das simulações da produção de sedimentos anuais usando os dados da previsão climática do RSM com o modelo hidrossedimentológico Kineros2, como apresentado no item 6.3, pôde ser calculado o assoreamento potencial do reservatório Pirapama ao longo do período compreendido entre janeiro a junho de 1987 a 2000.

A Figura 6.17 apresenta a comparação entre o assoreamento potencial calculado pelo modelo Kineros2 para a barragem Pirapama a partir dos dados de precipitação observados, como mostrado na Figura 5.17 e com os dados previstos pelo RSM. Os resultados mostraram

que o assoreamento potencial da barragem foi superior para as simulações que utilizaram os dados de precipitação observados.

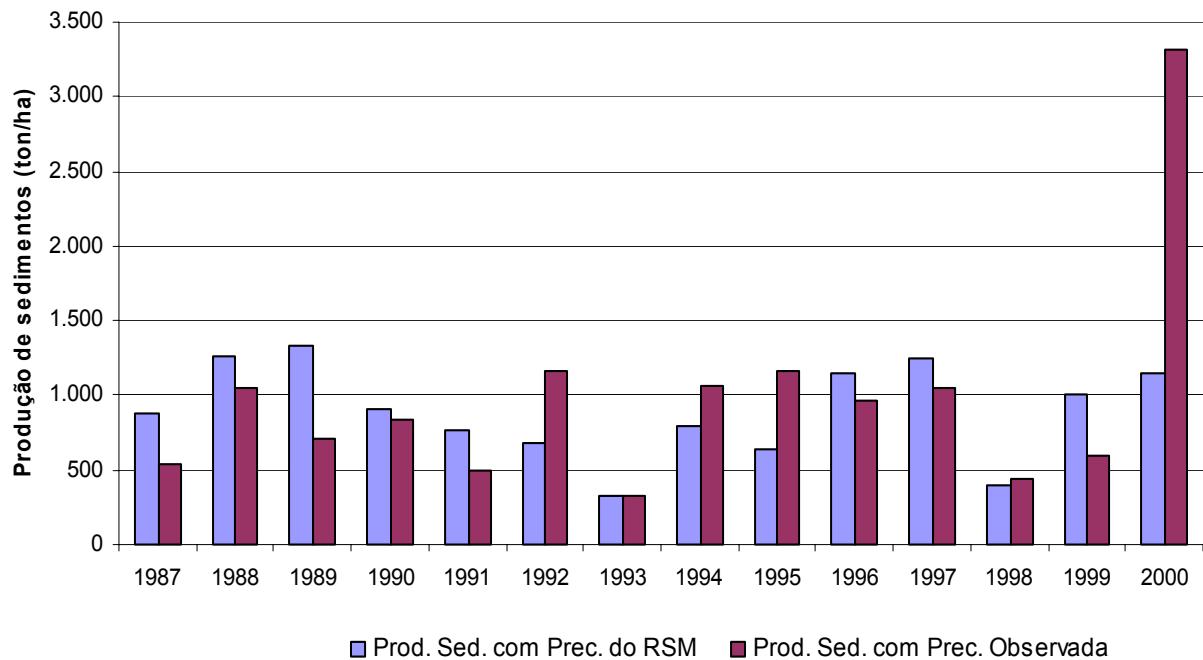


Figura 6.16 - Sedimentogramas anuais calculados chegando na barragem Pirapama a partir da precipitação observada e da média da precipitação do RSM.

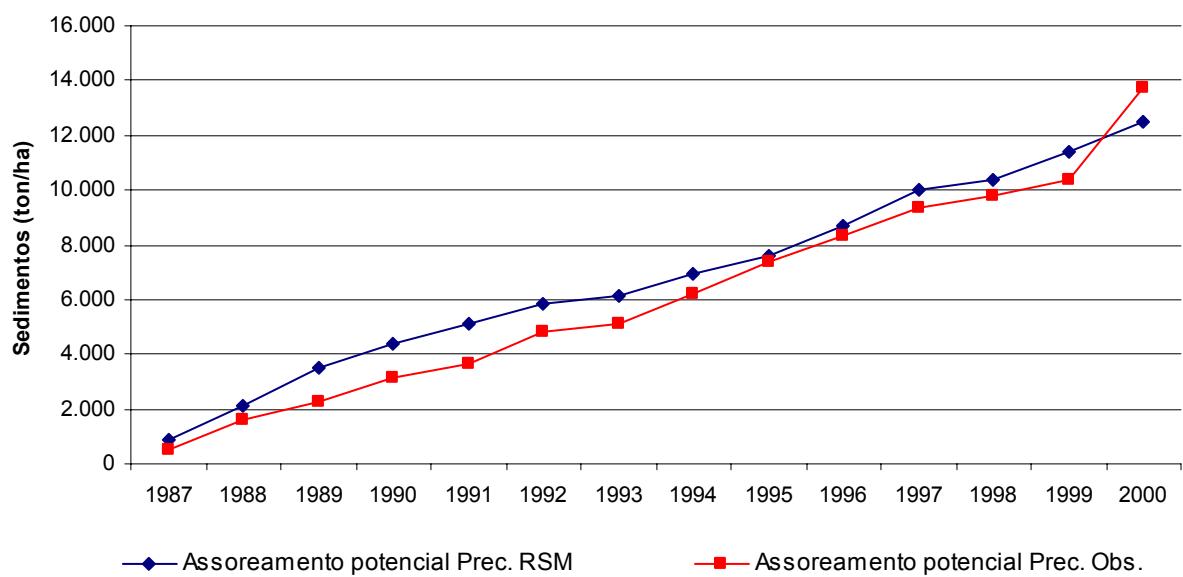


Figura 6.17 - Aporte de sedimentos anuais calculados para a barragem Pirapama a partir da precipitação observada e da precipitação média do RSM.

## 6.5 Distribuição Espacial da Previsão da Produção de Sedimentos

A elaboração da análise geoespacial da produção de sedimentos, foi elaborada a partir da entrada de dados pluviométricos obtidos da precipitação média prevista dos 10 membros do RSM no modelo hidrossedimentológico Kineros2 previamente calibrado, conforme mostrado no Capítulo 4.

A Figura 6.18 descreve a distribuição da produção média de sedimentos nos elementos planos discretizados apenas da bacia hidrográfica da barragem Pirapama. Essa área foi escolhida, pois são os locais potenciais que acarretam o assoreamento da barragem. A respeito da análise geoespacial das áreas susceptíveis ao processo de erosão, destaca-se que, algumas áreas apresentaram uma produção média anual de mais de 200 toneladas por hectare, mostrando a importância da análise pontual de locais da bacia que estão susceptíveis à erosão e a perda de solos. Deve-se salientar também, que a bacia é recoberta por extensas áreas de cultivo de cana-de-açúcar, matéria-prima para inúmeros engenhos localizados na bacia. Essas perdas acarretam vários problemas, tais como: diminuição da área agricultável e transporte de defensivos agrícolas nas partículas de sedimentos carreados para a barragem Pirapama.

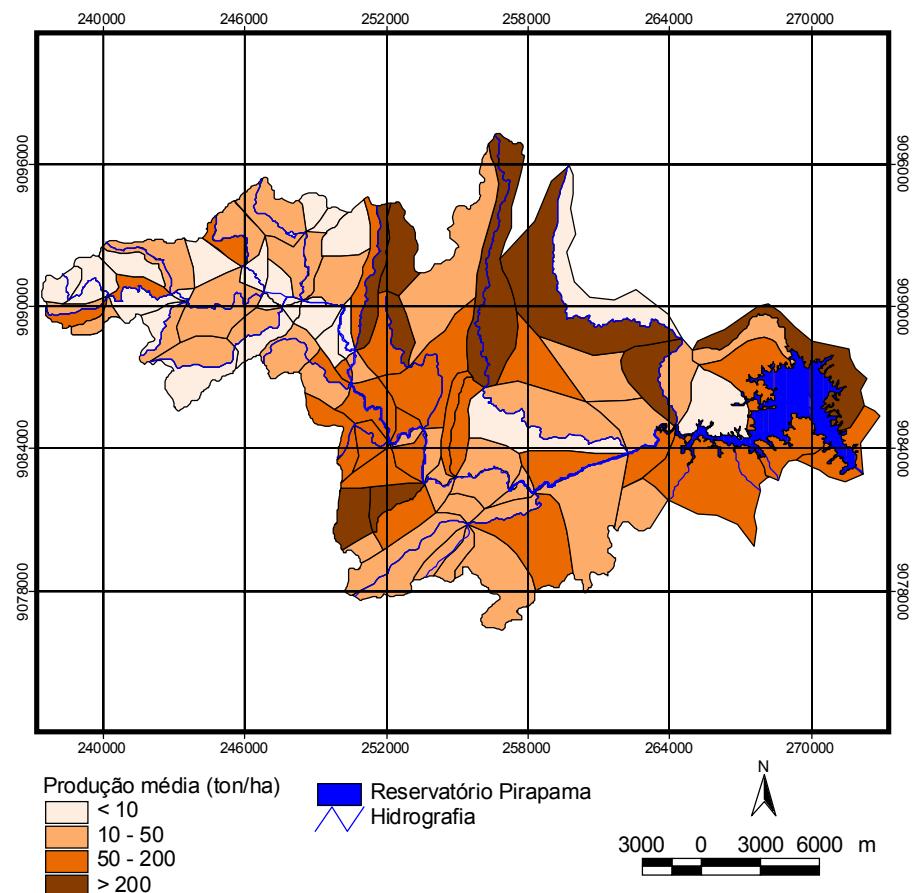


Figura 6.18 - Espacialização da produção sedimentos média calculada para cada elemento da bacia do reservatório Pirapama a partir da precipitação média do RSM.

O modelo Kineros2 forneceu estimativas de onde e quando a produção de sedimentos ocorreu em maior ou menor quantidade, facilitando a elaboração de mapas da ocorrência de perda de sedimentos em toda a bacia. Essa é a vantagem de se fazer simulações com base em modelos hidrológicos, entretanto, precauções devem ser tomadas quanto da interpretação quantitativa dos resultados, devendo ser direcionada maior atenção para os resultados qualitativos, relativos e comparativos do modelo.

Outro ponto que deve ser levado em consideração na análise dos resultados expostos, é que os modelos de circulação atmosférica, ainda apresentam grandes incertezas em suas previsões, pois o espaçamento da malha de pontos em que as simulações são feitas, ainda é muito grande e não representa bem o que deverá ocorrer ao nível de pequenas áreas, como é o caso de muitas bacias do litoral nordestino.

Assim, os erros aqui apresentados são principalmente oriundos da diferença entre os valores observados de chuva e os previstos pelo modelo de previsão climática; entretanto, com o avanço contínuo desses modelos, tais erros tenderão a diminuir no futuro, à medida do avanço tecnológico e do conhecimento do sistema atmosférico.

No entanto, as médias das vazões e da produção de sedimentos calculados a partir da chuva prevista pelo modelo RSM podem ser considerados promissores, pois retrataram a tendência tanto do escoamento como da erosão ao longo do período sazonal estudado na bacia.

## 7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

No presente trabalho foi apresentado o estudo da previsão hidrossedimentológica a partir do acoplamento de modelos de previsão climática e modelos de simulação de vazão e erosão. O modelo de previsão climática regional RSM foi aninhado ao modelo de previsão climática global ECHAM, e os resultados da previsão climática foram inseridos no modelo hidrológico Açumod e no modelo hidrossedimentológico Kineros2.

### 7.1 Conclusões

Os resultados da modelagem da vazão calculada pelo Açumod de 1987 a 2001 mostraram excelentes resultados comparando-as com as vazões calculadas, apresentando coeficiente de correlação igual a 0,91 para a calibração e 0,94 para a validação. O modelo se mostrou eficaz na conversão de chuva em vazão e pode ser considerado uma ferramenta útil na ajuda do processo de tomada de decisão dos recursos hídricos.

Com relação a parametrização do modelo Açumod, conclui-se que as cinco zonas hidrologicamente homogêneas apresentadas neste estudo, bem como os valores dos parâmetros *CRT*, que corresponde à capacidade média de armazenamento de água no solo, em milímetros; *DCRT*, que representa a capacidade de armazenamento de água no solo; *CQI*, coeficiente que simula a descarga dos reservatórios intermediários; e *FN*, parâmetro da função de infiltração, podem sofrer alterações após a realização de novos estudos na bacia com informações mais detalhadas a respeito das características físicas da mesma.

Sobre o modelo hidrossedimentológico Kineros2, conclui-se que o mesmo apresentou resultados satisfatórios na simulação da vazão para a bacia do rio Pirapama em 2001, apresentando coeficientes de correlação para os postos Ponte-PE 35, Destilaria Inexport, Pirapama e Destilaria Bom Jesus entre 0,84 e 0,88. Mesmo utilizando-se da calibração da vazão para a estimativa do volume de sedimentos carreados para a entrada d reservatório Pirapama e para cada elemento plano discretizado da mesma bacia entre 1987 e 2001, os resultados obtidos podem ser considerados aceitáveis. Entretanto, cuidados devem ser tomados com relação à calibração dos parâmetros e à determinação dos valores das variáveis do modelo, inclusive em relação à sua distribuição espacial, em função dos erros a eles associados. Em suma, as incertezas da distribuição dos parâmetros e às variáveis do modelo se propagam de forma significativa até as previsões, com uma propagação média de erro de 400%, afetando principalmente os valores mais baixos de erosão simulada.

Dos resultados obtidos da aplicação do modelo Kineros2, pôde-se observar que nos meses entre março e agosto houve aumento da produção de sedimentos transportados para o reservatório em comparação aos outros meses, período este que deve tomar mais atenção dos órgãos gestores quanto às práticas conservacionistas do solo.

Sobre os valores dos parâmetros do modelo Kineros2, como primeira tentativa de modelagem da vazão e da erosão, apresentou os valores do coeficiente de Manning ( $n$ ) e saturação efetiva do solo ( $S_i$ ) muito acima do recomendado na literatura. O coeficiente de Manning assumiu valores entre 0,06 e 0,08 para os planos para que os valores calculados dos maiores picos se ajustassem aos observados. O parâmetro  $S_i$  variou entre 0,7 e 0,9, valores acima do recomendado pela literatura utilizada (entre 0,1 a 0,4, de acordo com o tipo de solo) . Os valores dos parâmetros adotados acabaram influenciando na forma dos hidrogramas apresentados ao longo do trabalho, onde se pode notar um achatamento na forma do hidrograma calculado, ou seja, um maior retardamento do escoamento.

Com o objetivo de ajustar a vazão calculada aos maiores valores observados, o parâmetro de saturação efetiva do solo também foi calibrado com valores variando de 0,4 a 0,9, de acordo com o tipo de solo acima do aconselhado na literatura.

O trabalho chama a atenção para a importância de futuras pesquisas direcionadas para a identificação e controle de áreas susceptíveis ao processo de erosão na bacia. Pode-se concluir que a aplicação dos modelos Açumod e Kineros2 é viável e podem ser usados respectivamente em estudos de modelagem de vazão e de vazão-erosão em bacias litorâneas com áreas até 600 km<sup>2</sup>.

Sobre o acoplamento de modelos de previsão climática e hidrológica, é importante ressaltar que os resultados obtidos mostraram que a técnica de redução de escala pode representar um método muito importante na construção de um sistema integrado de chuva-vazão-erosão e pode ser usado como uma ferramenta na gestão dos recursos hídricos de uma bacia periurbana.

Os resultados da modelagem dos processos de vazão e erosão para a bacia do rio Pirapama, a partir dos dados de previsão climática, neste trabalho não se mostrou tão satisfatório para ambos os modelos quanto o esperado, uma vez que deve ser levada em consideração a incerteza que um sistema desses pode apresentar. No entanto, os resultados podem ser de grande valia para o aprimoramento de um sistema de previsão hidrossedimentológica em outras bacias da região. Além é claro, da utilização de dados de previsão climática feitas pelo RSM corrigidos através de equações, para que se obtenha uma diminuição do erro e da incerteza das previsões do modelo atmosférico.

O presente estudo não buscou julgar qual dos dois modelos oferece o melhor desempenho, mas sim, apresentar um sistema integrado de previsão hidrossedimentológica a partir do acoplamento de modelos de previsão climática e modelos hidrológicos distribuídos que possam ser utilizados em aplicações futuras para a bacia do rio Pirapama.

## 7.2 Recomendações

A partir dos resultados obtidos, permite-se fazer algumas recomendações para a realização de trabalhos subseqüentes e para o melhor controle dos recursos hídricos.

O modelo Kineros2 deve ser aplicado às sub-bacias da bacia do rio Pirapama, procurando ajustar mais precisamente a parametrização do modelo a partir de experimentos realizados com amostras de solo, e o levantamento mais detalhado da topografia de cada sub-bacia numa escala maior poderá ajudar na representação mais detalhada dos elementos da bacia.

Os resultados mostraram que o modelo Açumod obteve índices de correlação animadores, assim, recomenda-se a realização de novos estudos para a bacia do rio Pirapama para a comprovação dos parâmetros adotados neste trabalho.

No que tange ao assoreamento da barragem Pirapama, conclui-se do exposto que diversas medidas preventivas devem ser tomadas visando o controle do assoreamento da barragem, como:

- a) identificação mais específica das áreas susceptíveis ao processo de erosão;
- b) localização das fontes de produção de sedimentos;
- c) realização de obras mitigadoras contra a erosão na bacia;
- d) instalação de pontos de coleta de sedimentos em diversos pontos da bacia;
- e) realização de uma batimetria na Barragem Pirapama para a avaliação real do assoreamento do reservatório; e
- f) constantes manutenções na barragem, realizando remoção dos sedimentos acumulados através de descarga de fundo em períodos de cheia, buscando diminuir a quantidade de material carreado, o que aumentará a vida útil do reservatório.

Recomenda-se ainda, a realização de novos estudos com o modelo de circulação atmosférica RSM em estudos de previsão climática acoplado a modelos de simulação hidrossedimentológica em bacias periurbanas do Nordeste do Brasil.

## REFERÊNCIAS

- ALTSHULER, E.; FENNESSY, M.; SHUKLA, J.; JUANG, H.; ROGERS, E.; MITCHELL, K. & KANAMITSU, M. **Seasonal simulations over North America with a GCM and three regional models.** COLA Tech. Rep. 115, 2002. 60 p.
- ALVES, J. M. B. **Uma avaliação preliminar da simulação da precipitação sobre o Nordeste do Brasil usando o aninhamento de um modelo numérico regional e um modelo numérico global.** Anais... XII Congresso Brasileiro de Meteorologia. Jaboticabal: São Paulo-SP, 2002.
- ALVIM, A. M.; CHAUDHRY, F. H. **Modelo matemático do assoreamento de reservatórios.** Anais... VII Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos e III Simpósio Luso-Brasileiro de Hidráulica e Recursos Hídricos. Salvador-BA, 1987.
- ARAÚJO, A. M. **Evolução do processo de assoreamento em reservatório urbano.** Anais... IV Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos e I Encontro de Engenharia de Sedimentos do Mercosul, Santa Maria-RS, 2000.
- ARAÚJO, J. C. **Assoreamento em reservatórios do semi-árido: modelagem e validação.** Porto Alegre: *RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. ABRH, vol. 8, n.2, 2003a.
- ARAÚJO, C. C.; MARQUES, J. A. V.; SILVA NETO, A. R.; DOURADO, J. C.; MACHADO, R. N. S. **Estudo da produção de sedimento da sub-bacia do Ribeirão Taquaruçú Grande-TO.** Anais... XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Curitiba-PR, 2003b.
- BORGES, V. M. N. A. **Acoplamento de um modelo de previsão de demanda de água a um modelo simulador em tempo real – estudo de caso: sistema adutor Metropolitano de São Paulo.** São Paulo: /s.e./, 2003. (Dissertação de Mestrado/EPUSP/USP)
- BURCH, G. J. **Comparative hydrological behavior of forested and cleared catchments in southern Austrália.** *Journal of Hydrology*, n. 87, 1987. p. 19-42.
- CARVALHO, N. O.; CATHARINO, M. G. **Avaliação do assoreamento de reservatório da UHE Itaipu.** Anais... X Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos e I Simpósio de Recursos Hídricos do Cone Sul. Gramado-RS, 1993.
- CAVAGUTI, N.; SILVA, M. J. D. **Desenvolvimento urbano, erosão e degradação dos recursos hídricos por assoreamento em Bauru-SP.** Anais... X Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos/I Simpósio de Recursos Hídricos do Cone Sul. Gramado-RS, 1993.
- CETESB. Técnica de Abastecimento de Água. São Paulo: ABES, vol. 1 e 2, 1978.
- CHRISTENSEN, N. S.; WOOD, A. W.; VOISIN, N.; LETTENMAIER, D. P. & PALMER, R. N. **The effects of climate change on the hydrology and water resources of the Colorado river basin.** *Climatic Change*, 62 (1-3), 2004. p. 337-363.
- CHAVES, R. R.; RODRIGUES, D. A. **Apostila de GrADS.** Campinas: /s.e./, 2001.
- COMPESA. Plano Diretor do Recife de 1986. Recife, 1986.

**COMPESA/GEOSISTEMAS. Barragem Pirapama - Plano Básico Ambiental – PBA. Programa de Operação de Enchimento do Reservatório.** 2000.

CORRADINI, C.; MELONE, F.; SMITH, R. E. **Modeling infiltration during complex rainfall sequences.** Water Resources Research, 30 (10), 1994. pp. 2777-2784.

**CPRH/DFID.** Estudo dos recursos hídricos da bacia do rio Pirapama. Recife: Companhia Pernambucana de Meio Ambiente/Department for International Development. 1998.

CRUZ, M. A. S.; TUCCI, C. E. M.; SILVEIRA, A. L. L. **Controle do escoamento com detenção em lotes urbanos.** Porto Alegre: *RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. ABRH, v. 3, n. 2, 1998. pp. 75-92.

CRUZ JÚNIOR, D. C.; STRAUCH, J. C. M.; OLIVEIRA, L. C. **Uma abordagem da engenharia de sistemas sobre sistemas de informações geográficas.** 1999.

**DNAEE** (Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica) - Ministério das Minas e Energia do Brasil. Modelo SIMMQE – Conceituação. Brasília, 1983.

DOTY, B.; HOLT, T.; FIORINO, M. **Grid analysis and display system.** 1995. Disponível em: <ftp://grads.iges.org/grads/sprite/doc/>. Acessado em: 01 de dezembro de 2004.

ENGELUND, F. & HANSEN, E. **A monograph on sediment transport in alluvial streams.** Teknisk Forlag. Copenhagen, 1967. 62 p.

FAIR, G. M.; GEYER, J. C.; OKUN, D. A. **Water and wastewater engineering: water purification and wastewater treatment and disposal.** 2. ed., Nova York: John Wiley & Sons, EUA. 1968.

FALCÃO NETO, J. M. **Modelagem matemática da hidrodinâmica e da qualidade da água do trecho a jusante da barragem do rio Pirapama-PE, Brasil.** 2002. (Dissertação de Mestrado/PPGO/UFPE).

**FUNCENE.** Projeto Downscaling. Fortaleza, 2001. Disponível em: <http://www.funceme.br/demet/ds/>. Acessado em: 14 de dezembro de 2004.

GALVÃO, C. O. **Modelagem do escoamento superficial e da erosão do solo em microbacias.** Campina Grande: /s.e./, 1990. (Dissertação de Mestrado/PPGEC/CCT/ UFPB).

GALVÃO, C. O.; TRIGO, R. M. **Downscaling da precipitação e temperatura de modelos de circulação global para a escala de uma bacia hidrográfica.** Anais... IV Simpósio de Hidráulica e Recursos Hídricos dos Países de Língua Oficial Portuguesa, Coimbra. APRH, 1999.

GALVÃO, C. O.; CLARKE, R. T. **Previsibilidade da precipitação sazonal no Nordeste do Brasil simulada pelo modelo de circulação global atmosférica do ECMWF.** Porto Alegre: *RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. ABRH. 2002.

GALVÃO, C. O.; NOBRE, P. BRAGA, A. C. F. M.; OLIVEIRA, K. F.; SILVA, R. M.; SILVA, S. R.; GOMES FILHO, M. F.; SANTOS, C. A. G.; LACERDA F. & MONCUNILL, D. **Climatic predictability, hydrology and water resources over Nordeste Brazil.** *Regional Hydrological Impacts of Climatic Change—Impact Assessment and Decision Making* (Proceedings of symposium S6 held during the Seventh IAHS Scientific Assembly at Foz do Iguaçu, Brazil, April 2005). IAHS Publ. 295, 2005.

GAMA, A. M. C. F. **Avaliação da agenda 21 da bacia hidrográfica do Rio Pirapama.** Recife: /s.e./, 2003. (Dissertação de Mestrado/PPGGPA/UFPE).

GOMES, H. P. **Sistemas de abastecimento de água: dimensionamento econômico.** 2. ed. João Pessoa: Editora Universitária da UFPB. 2002.

HALL, B. L.; BROWN, T. J. & ROADS, J. O. **Evaluation and utilization of Scripps ECPC fire weather forecasts.** AMS Annual Meeting. Long Beach-CA, january 9-13, 2000.

HAMLET, A. F. **Climate Change in the Columbia river basin.** JISAO Climate Impacts Group. University of Washington, 2003.

HONG, S.-Y. & LEETMA, A. **An evaluation of the NCEP RSM for regional climate modeling.** *Journal of Climate*, 12, 592-609. 1999.

JAIN, S. K. & DOLEZAL, F. **Modeling soil erosion using EPIC supported by GIS, Bohemia, Czech Republic.** *Journal of Environmental Hydrology*, vol. 8. 2000.

JAIN, A.; ORMSBEE, L. E. **Short-term water demand forecast modeling techniques - conventional methods versus AI.** *Journal American Water Works Association*, vol. 94, n. 7, 2002. p.64-72.

JOO, C. N. ; KOO, J. Y.; YU, M . J. **Application of short-term water demand prediction model to Seoul.** *Water Science and Technology*, vol. 46, n. 6-7, 2002. p.255-261.

JUANG, H.-M. H. & KANAMITSU, M. **The NMC nested regional spectral model.** *Monthly Weather Review*, 122, 3-26. 1994.

JUANG, H.-M. H.; HONG, S.-Y.; & KANAMITSU, M. **The NCEP regional spectral model: an update.** *Bull. Amer. Met Soc.*, 78, 2125-2143. 1997.

KALIN, L.; GOVINDARAJU, R. S.; HANTUSH, M. M. **Effect of geomorphologic resolution on modeling of runoff hydrograph and sedimentograph over small watersheds.** *Journal of Hydrology*. 276, 2003. pp. 89-111

LACROIX, M. P.; MARTZ, L. W.; KITE, G. W. & GARBRECHT, J. **Using digital terrain analysis modeling techniques for the parameterization of a hydrologic model.** *Environmental Modelling & Software*, n. 17, 2002. pp.127-136.

LEDOUX, E., GIRARD, G.; MARSILLY, G.; DESCENES, J. Spatially distributed modeling: conceptual approach, coupling surface water and ground water, NATO, ASI Series C. In: MOREL-SEYTOUX, X. (ed.). **Unsaturated flow hydrologic modeling-theory and practice.** Kluwer Academic, Dordrecht, 1989. pp. 435-454.

LOPES, J. E.; SANTOS, R. C. P. **Capacidade de reservatórios**. São Paulo: /s.e./, 2002.

LOPES, W. T. A. **Efeitos de escala na modelagem hidrossedimentológica na região semi-árida da Paraíba**. Campina Grande: s.e., 2003. (Dissertação de Mestrado/PPGEC/CCT/UFCG).

MAIDMENT, D. R. Developing a spatially distributed unit hydrograph by using GIS. In: DOVAR, K.; NATCHNEBEL, H. P. (eds.). **Application of geographic information systems in hydrology and water resources**, Proceedings of the Vienna Conference, Vienna: Int. Assoc. of Hydrological Sci., 1993. pp. 181-192.

MEDEIROS, A. M. T. **Variabilidade espaço-temporal da precipitação pluvial diária sobre a bacia hidrográfica do Açude Epitácio Pessoa**. Campina Grande:/s.e./, 2003. (Dissertação de Mestrado/PPGM/DCA/CCT/UFCG).

METCALF, A. & EDDY, B. **Wastewater engineering: treatment, disposal and reuse**. 3. ed. Singapore: Mc-Graw-Hill International Editions, 1991.

MISRA, V.; DIRMEYER, P. A. & KIRTMAN, B. P. **Dynamic downscaling of regional climate over South America**. *Journal of Climate*, 16, 2003. pp.103-117.

MISRA, V. & KANAMITSU, M. **Anomaly Nesting: A Methodology to Downscale Seasonal Climate Simulations from AGCMs**. *Journal of Climate*. vol. 17, n. 17, 1 sep., 2004.

NASCIMENTO, B. B. **Vulnerabilidade do sistema de abastecimento de água potável da Região Metropolitana do Recife: intermitência e poluição**. Recife: /s.e./, 2003. (Dissertação de Mestrado/PPGPA/UFPE).

OGURA, A. T.; GOUVEIA, M. I. F.; RIDENTE JÚNIOR, J. L.; CANIL, K.; ALMEIDA FILHO, G. S. **A Dinâmica dos processos de erosão e assoreamento e a gestão dos recursos hídricos**. Anais... XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Vitória-ES, 1997.

OLIVEIRA, L. C. K. **Papel do monitoramento e da previsão de vazões no gerenciamento de bacias hidrográficas**. Rio de Janeiro: /s.e./, 2003. (Dissertação de Mestrado/Engenharia Civil/PPGE/UFRJ).

PAIVA, A. E. D. B. **Simulações hidrológicas na bacia do rio Gramame como subsídio ao processo de outorga**. Campina Grande: /s.e./, 2000. (Dissertação de Mestrado/PPGEC/CCT/UFPB).

PAN, H. L. & MAHRT, L. **Interaction between soil hydrology and boundary-layer development**. *Bound. Layer Met.* 38, 1987. pp. 185-202.

PULLAR, D. & SPRINGER, D. **Towards integrating GIS and catchment models**. *Journal of Hydrology*. vol. 15, issue 5, July, 2000. pp. 451-459.

QASIM, S. R. **Wastewater treatment plants: planning, design, and operation**. USA, CBS College Publishing, 1985.

- RAMIREZ, M. R. **Sistemas gerenciadores de banco de dados para Geoprocessamento.** Rio de Janeiro: /s.e./, 1994. (Dissertação de Mestrado/COPPE/UERJ).
- RAMOS, C. L.; CINTRA, F. A.; IJICHI, T.; NAKAE, T. **Avaliação do volume de assoreamento a partir de dados sedimentométricos.** Anais... V Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos. Blumenau-SC, 1983.
- RAWLS, W. J.; AHUJA, L. R.; BRAKENSIEK, D. L.; SHIRMOHAAMMADI, A. Infiltration and soil water movement. In: RAWLS, W. J. (org.) **Handbook on applied hydrology.** McGraw Hill, 1991.
- RIOS, M. M. R. **Alternativas para outorga e a cobrança pelo uso da água: simulação de um caso.** Porto Alegre: /s.e./, 2000. (Tese de Doutorado/IPH/UFRGS).
- ROADS, J. O. & CHEN, S. C. **Surface water and energy budgets in a regional model.** The European Geophysical Society Meeting. Nice, France. April 23-29, 2000.
- ROECKNER, E.; ARPE, K.; BENGTSSON, L.; CHRISTOPH, M.; CLAUSSEN, M.; DÜMENIL, L.; ESCH, M.; GIORGETTA, M.; SCHLESE, U.; & SCHULZWEIDA, U. **The atmospheric general circulation model ECHAM4: model description and simulation of present-day climate.** Max-Planck-Institut für Meteorologie, Hamburg, Report n. 218. 1996.
- ROSA, E. U. **Desenvolvimento de procedimentos computacionais para integração de sistemas de informação geográfica com modelo hidrológico chuva-vazão em bacias urbanas.** Rio de Janeiro: /s.e./, 2002. (Dissertação de Mestrado/PPGEC/UFRJ).
- ROVEY, E. W.; WOOLHISER, D. A.; SMITH, R. E. **A distributed kinematic model of upland watershed.** Hydrology Paper 93, Colorado State University, Fort Collins, 1977.
- RUFINO, I. A. A.; GALVÃO, C. O.; SRINIVASAN, V. S. **Representação espacial de processos decisórios na gestão dos recursos hídricos em áreas urbanas.** Anais... XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Curitiba-PR, 2003.
- SAGHAFIAN, B.; VAN LIESHOUT A. M & RAJAEIL, H. M. **Distributed catchment simulation using a raster GIS.** *Environmental Modelling and Software*, vol. 2, issue 3-4, july, 2000. pp. 199-203.
- SANTOS, C. C. **Modelagem de bacias urbanas com redes neurais artificiais.** São Paulo: /s.e./, 2001a. (Dissertação de Mestrado/EPUSP).
- SANTOS, C. A. G.; SUZUKI, K.; LOPES, W. T. A. **Sediment yield in Ishite watershed using a runoff-erosion kinematic model.** XXIX IAHR Congress, Beijing, China, p. 146-151, 2001b.
- SANTOS, C. A. G.; SILVA, R. M.; NITÃO, I. **Aplicação de um modelo hidrossedimentológico distribuído à bacia hidrográfica do rio Pirapama-PE.** Anais... XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Curitiba - PR, 2003.

SANTOS, C. A. G.; SILVA, R. M.; NITÃO, I. A. **A numerical modeling for surface runoff and sediment yield coupled to a GIS.** Anais... XXV CILAMCE - Iberian Latin American Congress on Computational Methods. Recife-PE, 2004a.

SANTOS, C. A. G.; SILVA, R. M.; NITÃO, I. A. **Modelagem do escoamento superficial numa bacia periurbana no Nordeste do Brasil.** Anais... VII Simpósio Nordestino de Recursos Hídricos. São Luís - MA, 2004b.

SANTOS, C. A. G.; SILVA, R. M.; NITÃO, I. A. **Estimativa da produção de sedimentos através do modelo Kineros2 na barragem Pirapama-PE.** Anais... VI ENES - Encontro Nacional de Engenharia de Sedimentos. Vitória-ES, 2004c.

SANTOS, C. A. G.; SRINIVASAN, V. S.; SILVA, R. M. **Evaluation of optimized parameter values of a distributed runoff-erosion model applied in two different basins.** *Sediment Budgets II* (Proceedings of symposium S1 held during the Seventh IAHS Scientific Assembly at Foz do Iguaçu, Brazil, April 2005). IAHS Publ. 292, 2005.

SANTOS, C. A. G.; SILVA, R. M.; NITÃO, I. A. **Geospatial assessment of sediment yield and surface runoff in Pirapama river basin.** *Sediment Budgets Symposium – VII IAHS Scientific Assembly, ABGE*: Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 2005b.

SCHAAKE, J. C.; LIU, C. Development and application of simple water balance models to understand relationship between climate and water resources. In: KAVVAS, M. L. (ed.). **New directions for surface water modeling (Proceedings of the Baltimore Symposium)** IAHS Publ., n.189. 1989.

SEMMENS, D. J., MILLER, S. N.; HERNANDEZ, M.; BURNS, I. S.; MILLER, W. P.; GOODRICH, D. C. **Automated geospatial watershed assessment (AGWA) – a GIS-based hydrologic modeling tool: documentation and user manual.** USDA-ARS. Tucson, Arizona, 2000.

SHRIMALI, S. S.; AGGARWALZ, S. P. & SAMRA, J. S. **Prioritizing erosion-prone areas in hills using remote sensing and GIS - a case study of the Sukhna Lake catchment, Northern India.** *JAG*, vol. 3, issue 1, 2001.

SILANS, A. M. B. P.; PAIVA, A. E. D. B.; ALMEIDA, C. N.; ALBUQUERQUE, D. J. S. **Aplicação do modelo hidrológico distribuído Açumod à bacia hidrográfica do rio do Peixe - Estado da Paraíba.** Porto Alegre: *RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. ABRH, vol. 5 (3), set. de 2000.

SILVA, A. S.; COELHO, D. G.; SILVA, M. G. A. J. **Impacto do aumento da resolução espacial na previsão do tempo regional.** Anais... XII Congresso Brasileiro de Meteorologia. Jaboticabal-SP, 2002.

SILVA, R. M.; SANTOS, C. A. G.; NITÃO, I. A. **Modelagem hidrossedimentológica na barragem Pirapama em Pernambuco.** Anais... XI SILUBESA - Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Natal-RN, 2004.

SILVA, R. M.; SANTOS, C. A. G.; MARINHO, L. S.; NITÃO, I. A. **Application of a distributed hydrologic and geographically referenced model to Pirapama river basin.** Anais... XXV CILAMCE - Iberian Latin American Congress on Computational Methods. Recife-PE, 2004.

SILVA JÚNIOR, A. N.; SILANS, A. M. B. P.; PAIVA, A. E. D. B.; ALMEIDA, C. N. Aplicação do modelo hidrológico distribuído Açumod à bacia hidrográfica do rio Gramame - Estado da Paraíba. João Pessoa: Editora Universitária. 2000. p. 48-56.

SMITH, R. E.; CORRADINI, C.; MELONE, F. **Modeling infiltration for multistorm runoff events.** Water Resources Research, 29 (1), 1993. pp. 133-144.

SOUZA FILHO, F. A.; PORTO, R. L. L. **Acoplamento de modelo climático e modelo hidrológico.** Anais... XV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Curitiba-PR, 2003.

STARK, H. L.; STANLEY, S. J.; BUCHANAN, I. D. **Water demand forecasting using artificial neural networks.** OWWA and OWWA Joint Annual Conference. 1999.

STRETTA, C. **Hydrodynamic modelling of the Pirapama Estuarine System after upstream regulation.** Rapport INPT/ENSEEIHT, 2000.

TODINI, E. **Rainfall-runoff modeling, past, present and future.** Journal of Hydrology. Amsterdam, n. 100, 1988. p.341-352.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos.** Porto Alegre: Editora da UFRGS e ABRH, 1998.

TUNDISI, J. G. **Água no século XXI: enfrentando a escassez.** 2. ed. São Carlos: RiMA, 2003.

VIANA, G. M. **Sistemas públicos de abastecimento.** João Pessoa: /s.e./, 2000.

VILHENA, R. M.; ROIG, H. L.; MENESES, P. R. **Determinação do assoreamento de reservatório utilizando técnicas de Geoprocessamento, o caso do reservatório de Funil-RJ.** Anais... XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. Belo Horizonte-MG, 2003.

YU, Z.; BARRON, E. J.; YARNAL, B.; LAKHTAKIA, M. N.; WHITE, R. A.; POLLARD, D.; MILLER, D.A. **Evaluation of basin-scale hydrologic response to a multi-storm simulation.** Journal of hydrology, v.257, 2002. pp. 212-225.

WOOD, A. W.; LEUNG, L. R.; SRIDHAR, V. & LETTENMAIER, D. P. **Hydrologic implications of dynamical and statistical approaches to downscaling climate model outputs.** Climatic Change, in press, 2003.

WOOD, E. F. & O'CONNELL, P. E., 1985. Real-time forecasting. In: ANDERSON, M.; BURT, T. (eds.). **Hydrological Forecasting**, New York: John Wiley and Sons, 1985, p. 505-558.

WOOLHISER, D. A., SMITH, R. E. & GOODRICH, D.C. **Kineros, a kinematic runoff and erosion model: documentation and user manual.** U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service, ARS-77, 1990.

## **APÊNDICE A**

**VAZÕES OBSERVADAS E CALCULADAS PELO MODELO AÇUMOD  
PARA O POSTO PIRAPAMA**

Tabela A.1 - Vazões observadas e calculadas pelo modelo Açumod durante a calibração para o posto fluviométrico Pirapama entre 1987 e 1994

Ano	Mês	Vazão Calculada média mensal (m <sup>3</sup> )	Vazão Observada média mensal (m <sup>3</sup> )	Precipitação média da bacia (mm)
1987	1	10,47	7,40	65,30
1987	2	6,59	18,20	76,46
1987	3	9,69	33,60	172,22
1987	4	36,19	18,50	373,68
1987	5	5,90	9,50	77,66
1987	6	25,99	26,90	302,51
1987	7	20,16	19,00	228,62
1987	8	9,02	13,70	136,48
1987	9	4,90	10,10	57,87
1987	10	2,90	6,60	66,68
1987	11	1,59	4,50	9,94
1987	12	1,35	4,70	15,02
1988	1	3,63	4,40	91,45
1988	2	1,58	4,10	53,91
1988	3	10,90	5,40	221,49
1988	4	17,91	23,90	229,11
1988	5	44,55	33,30	380,35
1988	6	19,88	16,20	248,01
1988	7	59,08	54,50	463,65
1988	8	12,20	18,90	152,60
1988	9	2,95	12,00	63,65
1988	10	1,18	6,30	36,00
1988	11	1,09	5,30	47,47
1988	12	4,97	4,50	95,98
1989	1	2,09	4,90	62,08
1989	2	0,85	3,70	55,92
1989	3	2,92	5,80	109,46
1989	4	21,85	34,00	293,05
1989	5	26,61	32,60	264,55
1989	6	16,78	25,30	218,50
1989	7	60,12	65,80	481,92
1989	8	8,24	22,50	131,17
1989	9	2,07	12,30	56,89
1989	10	0,90	8,50	39,19
1989	11	0,89	7,80	54,65
1989	12	1,64	10,10	67,11
1990	1	1,13	6,30	44,40
1990	2	0,37	3,20	29,40
1990	3	0,28	4,40	27,35
1990	4	15,14	10,10	302,16
1990	5	19,05	17,80	258,98
1990	6	32,25	25,80	315,00
1990	7	53,45	38,50	430,95
1990	8	28,61	33,20	271,70
1990	9	6,12	13,00	120,31
1990	10	3,40	9,40	68,72

Tabela A.1 - Vazões observadas e calculadas pelo modelo Açumod durante a calibração para o posto fluviométrico Pirapama entre 1987 e 1994 (Continuação)

Ano	Mês	Vazão Calculada média mensal (m <sup>3</sup> )	Vazão Observada média mensal (m <sup>3</sup> )	Precipitação média da bacia (mm)
1990	11	0,74	7,30	52,07
1990	12	0,63	4,50	27,55
1991	1	0,47	4,02	24,47
1991	2	0,50	4,01	22,14
1991	3	0,89	4,00	59,41
1991	4	6,95	3,80	126,72
1991	5	29,60	19,22	314,61
1991	6	16,89	21,21	232,29
1991	7	22,56	24,79	286,43
1991	8	24,91	24,58	241,00
1991	9	2,62	9,60	37,32
1991	10	5,72	9,49	135,35
1991	11	0,74	6,13	15,67
1991	12	0,43	5,27	2,14
1992	1	2,43	8,09	89,87
1992	2	10,00	15,53	242,39
1992	3	25,64	26,30	374,75
1992	4	14,21	14,29	130,93
1992	5	3,77	8,07	123,68
1992	6	50,31	49,55	429,95
1992	7	29,54	29,54	294,36
1992	8	14,38	19,04	193,42
1992	9	20,45	23,94	235,54
1992	10	1,18	8,67	27,17
1992	11	0,98	7,66	52,90
1992	12	0,40	6,33	2,59
1993	1	0,34	5,86	14,36
1993	2	0,22	5,46	0,17
1993	3	3,00	5,00	67,32
1993	4	2,52	4,20	79,38
1993	5	1,46	4,05	50,30
1993	6	11,72	8,71	225,36
1993	7	25,80	21,56	286,16
1993	8	7,51	6,41	115,21
1993	9	1,08	3,67	34,15
1993	10	0,52	3,41	35,22
1993	11	0,40	3,09	39,49
1993	12	0,47	1,55	37,71
1994	1	3,67	2,24	101,14
1994	2	8,20	2,63	152,77
1994	3	4,63	1,70	162,63
1994	4	7,77	5,28	182,59
1994	5	61,26	46,93	573,63
1994	6	36,34	50,00	320,53
1994	7	30,71	40,44	332,09
1994	8	10,98	18,89	142,06

Tabela A.1 - Vazões observadas e calculadas pelo modelo Açumod durante a calibração para o posto fluviométrico Pirapama entre 1987 e 1994 (Continuação)

Ano	Mês	Vazão Calculada média mensal (m <sup>3</sup> )	Vazão Observada média mensal (m <sup>3</sup> )	Precipitação média da bacia (mm)
1994	9	11,83	16,13	182,03
1994	10	1,88	8,09	45,99
1994	11	0,62	6,83	14,27
1994	12	0,66	5,30	43,51

Tabela A.2 - Vazões observadas e calculadas pelo modelo Açumod durante a validação para o posto fluviométrico Pirapama entre 1995 e 2001

Ano	Mês	Vazão calculada média mensal (m <sup>3</sup> )	Vazão observada média mensal (m <sup>3</sup> )	Precipitação média da bacia (mm)
1995	1	5,36	3,79	19,09
1995	2	4,26	3,59	33,27
1995	3	13,66	4,3	145,36
1995	4	11,3	5,92	191,4
1995	5	35,36	20,48	351,27
1995	6	39,44	30,96	397,41
1995	7	55,82	38,97	467,07
1995	8	8,88	11,11	92,7
1995	9	3,28	6,92	16,33
1995	10	2,09	6,99	12,95
1995	11	4,63	8,42	127,89
1995	12	1,36	5,19	0,06
1996	1	4,99	7,01	122,84
1996	2	4,29	5,43	86,75
1996	3	3,21	5,27	103,05
1996	4	11,59	16,98	251,71
1996	5	13,33	15,66	152,63
1996	6	30,85	17,86	296,53
1996	7	29,99	25,31	347,32
1996	8	28,55	19,46	285,41
1996	9	12,75	10,74	169,72
1996	10	2,1	4,81	51,28
1996	11	8,75	6,7	157,23
1996	12	0,78	4,13	17,69
1997	1	0,56	3,24	2,22
1997	2	11,7	7,93	228,52
1997	3	9,94	11,25	207,38
1997	4	46,87	32,55	427,4
1997	5	50,59	38,1	517,42
1997	6	9,33	18,04	131,47
1997	7	21,01	20,75	252,08
1997	8	15,64	17,32	175,49
1997	9	2,44	7,81	29,14
1997	10	0,88	5,44	10,34
1997	11	0,61	4,43	15,39

Tabela A.2 - Vazões observadas e calculadas pelo modelo Açumod durante a validação para o posto fluviométrico Pirapama entre 1995 e 2001 (Continuação)

Ano	Mês	Vazão calculada média mensal (m <sup>3</sup> )	Vazão observada média mensal (m <sup>3</sup> )	Precipitação média da bacia (mm)
1997	12	1,38	4,28	66,97
1998	1	0,91	4,37	53,62
1998	2	0,49	3,69	39,0
1998	3	2,64	2,86	104,08
1998	4	5,9	4,23	145,98
1998	5	12,72	7,14	235,03
1998	6	8,43	4,87	120,83
1998	7	14,81	7,38	234,6
1998	8	32,79	16,86	330,54
1998	9	3,72	4,58	64,4
1998	10	1,37	3,08	36,43
1998	11	0,68	2,21	23,68
1998	12	0,64	1,76	28,56
1999	1	0,92	1,9	57,17
1999	2	18,52	14,23	168,46
1999	3	1,98	2,05	77,75
1999	4	1,91	1,43	89,93
1999	5	17,96	6,72	263,66
1999	6	13,35	8,51	197,8
1999	8	12,75	5,97	184,5
1999	9	5,85	4,95	86,34
1999	10	2,59	3,29	80,32
1999	11	0,75	2,03	18,36
1999	12	6,94	2,14	166,67
2000	1	15,6	12,17	233,45
2000	2	1,04	2,13	54,3
2000	3	2,81	2,36	149,85
2000	4	26,25	17,67	338,79
2000	5	22,11	15,3	258,3
2000	6	100,4	58,37	716,59
2000	7	70,85	74,83	613,0
2000	8	84,48	60,28	552,91
2000	9	53,82	46,16	455,98
2000	10	3,5	14,24	76,91
2000	11	1,01	7,23	42,46
2000	12	6,26	7,6	114,41
2001	1	1,71	5,02	74,95
2001	2	0,3	3,86	20,26
2001	3	3,21	5,07	152,54
2001	4	7,33	8,0	198,31
2001	5	1,37	3,95	42,92
2001	6	31,38	22,32	382,08
2001	7	16,2	13,27	218,98
2001	8	20,34	7,73	235,16
2001	9	5,71	5,63	92,39
2001	10	3,56	4,16	91,05
2001	11	0,72	2,3	26,56
2001	12	0,79	2,03	81,01

**APÊNDICE B**

CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS DOS ELEMENTOS DISCRETIZADOS  
DA BACIA DO RIO PIRAPAMA

Quadro B.1 - Características geométricas e seqüência de cálculo dos elementos da bacia do rio Pirapama pelo modelo Kineros2

Elemento	Área (m <sup>2</sup> )	Comprimento do plano (m)	Largura do plano (m)	Declividade	Comprimento do canal (m)	Elemento anterior		
						Superior	Esquerda	Direita
1	61,9	503,1	1.200	0,159				
2	109,9	894,2	1.200	0,045				
3					1.230		2	1
4	186,3	684,4	2.700	0,117				
5	92,3	339,2	2.700	0,118				
6					2.722	3	5	4
7	91,7	296,5	3.100	0,404				
8	114,9	371,1	3.100	0,323		10		
9					3.091		7	8
10	106,0	341,7	3.100	0,233				
11					4.060	6, 9	12	13
12	228,4	562,7	4.100	0,142				
13	124,5	306,7	4.100	0,260		14		
14	219,2	540,0	4.100	0,148				
15					976	11, 18	16	17
16	11,0	112,5	980	0,355				
17	21,6	221,5	980	0,180				
18					4.334		19	20
19	87,5	201,9	4.300	0,396				
20	322,2	743,5	4.300	0,107				
21					5.139	15, 33	23	22
22	284,7	554,0	5.100	0,216				
23	376,2	732,1	5.100	0,164				
24	42,1	398,5	1.100	0,100				

Quadro B.1 - Características geométricas e seqüência de cálculo dos elementos da bacia do rio Pirapama pelo modelo Kineros2 (Continuação)

Elemento	Área (m <sup>2</sup> )	Comprimento do plano (m)	Largura do plano (m)	Declividade	Comprimento do canal (m)	Elemento anterior		
						Superior	Esquerda	Direita
25	148,1	1.400,2	1.100	0,057				
26					1.057	21, 40	24	25
27	17,8	210,5	840	0,019				
28	37,8	448,0	840	0,089				
29					845	26, 48	28	27
30					3.936		44	45
31	132,4	376,0	3.500	0,212				
32	157,3	446,8	3.500	0,179				
33					3.521		31	32
34	252,0	629,5	4.000	0,063				
35	154,3	385,6	4.000	0,311		34		
36	263,9	659,2	4.000	0,182				
37					4.003		35	36
38	95,2	536,5	1.800	0,075				
39	56,4	317,9	1.800	0,126				
40					1.774	37	39	38
41	251,8	707,3	3.600	0,113				
42	161,0	452,1	3.600	0,177		57		
43					3.561	60	41	42
44	314,5	799,1	3.900	0,284				
45	333,8	848,0	3.900	0,014				
46	191,2	604,8	3.200	0,132				
47	189,8	600,4	3.200	0,133				
48					3.161	30	46	47

Quadro B.1 - Características geométricas e seqüência de cálculo dos elementos da bacia do rio Pirapama pelo modelo Kineros2 (Continuação)

Elemento	Área (m <sup>2</sup> )	Comprimento do plano (m)	Largura do plano (m)	Declividade	Comprimento do canal (m)	Elemento anterior		
						Superior	Esquerda	Direita
49	122,5	371,1	3.300	0,108				
50	225,8	684,4	3.300	0,117				
51					3.300		49	50
52	190,6	936,0	2.000	0,085				
53	378,6	1.858,9	2.000	0,065		55		
54					2.037	29, 43	52	53
55	327,4	1.607,6	2.000	0,025				
56	126,7	311,7	4.000	0,128				
57	85,9	241,2	3.600	0,166				
58	261,3	645,2	4.000	0,124		56		
59	193,3	477,2	4.000	0,167				
60					4.050		59	58
61	307,3	445,0	6.900	0,179		64		
62	242,0	350,5	6.900	0,342				
63					6.906		62	61
64	411,9	596,4	6.900	0,335				
65	103,5	313,0	3.300	0,128				
66	208,7	522,8	4.000	0,230		263		
67	325,6	815,7	4.000	0,196				
68					3.992		67	66
69	74,0	304,0	2.400	0,131				
70	154,0	633,1	2.400	0,063				
71					2.433	54	70	69

Quadro B.1 - Características geométricas e seqüência de cálculo dos elementos da bacia do rio Pirapama pelo modelo Kineros2 (Continuação)

Elemento	Área (m <sup>2</sup> )	Comprimento do plano (m)	Largura do plano (m)	Declividade	Comprimento do canal (m)	Elemento anterior		
						Superior	Esquerda	Direita
72	56,5	371,0	1.500	0,215				
73	84,1	551,7	1.500	0,145				
74					1.524	71, 63	72	73
75	86,1	336,0	2.600	0,238				
76	219,2	855,3	2.600	0,093				
77					2.563	51	75	76
78	189,2	1.124,4	1.700	0,142				
79	106,1	630,7	1.700	0,254				
80					1.683		78	79
81	173,5	454,7	3.800	0,264				
82	211,7	554,7	3.800	0,288				
83					3.817	74, 77	81	82
84	450,9	875,4	5.200	0,183				
85	478,6	929,2	5.200	0,129				
86					5.151	68	84	85
87	120,2	555,9	2.200	0,216				
88	63,9	295,6	2.200	0,406				
89					2.162	80	88	87
90	171,1	716,1	2.400	0,056		93		
91	122,5	512,5	2.400	0,078				
92					2.389	86, 274	90	91
93	278,7	1.166,3	2.400	0,206				
94	87,2	410,1	2.100	0,292				

Quadro B.1 - Características geométricas e seqüência de cálculo dos elementos da bacia do rio Pirapama pelo modelo Kineros2 (Continuação)

Elemento	Área (m <sup>2</sup> )	Comprimento do plano (m)	Largura do plano (m)	Declividade	Comprimento do canal (m)	Elemento anterior		
						Superior	Esquerda	Direita
95	321,4	971,8	3.300	0,247				
96	221,3	669,1	3.300	0,179		95		
97	289,0	873,8	3.300	0,091		65		
98					3.308		96	97
99	59,1	305,2	1.900	0,131				
100	127,3	657,0	1.900	0,061				
101					1.937	98, 92	99	100
102	249,7	662,5	3.800	0,060		105		
103	299,3	794,0	3.800	0,050				
104					3.770	101, 111	102	103
105	143,5	380,8	3.800	0,105				
106	407,3	658,2	6.200	0,060				
107	405,2	654,9	6.200	0,061				
108					6.188		106	107
109	255,8	526,7	4.900	0,152				
110	174,2	358,7	4.900	0,223				
111					4.857		110	109
112	920,7	705,5	13.000	0,283				
113	416,7	319,3	13.000	0,501				
114					13.050		113	112
115	530,7	700,3	7.600	0,343				
116	358,0	472,4	7.600	0,508				
117			3.300		7.578		116	115

Quadro B.1 - Características geométricas e seqüência de cálculo dos elementos da bacia do rio Pirapama pelo modelo Kineros2 (Continuação)

Elemento	Área (m <sup>2</sup> )	Comprimento do plano (m)	Largura do plano (m)	Declividade	Comprimento do canal (m)	Elemento anterior		
						Superior	Esquerda	Direita
118	167,0	448,4	3.700	0,357				
119	137,9	370,4	3.700	0,324				
120					3.724		119	118
121	670,3	1.202,9	5.600	0,099				
122	445,7	799,8	5.600	0,100				
123					5.572		121	122
124	117,4	494,5	2.400	0,162				
125	260,1	1.095,1	2.400	0,036				
126					2.375	117, 120	125	124
127	14,2	157,5	900	0,254				
128	27,0	300,1	900	0,133				
129	257,7	317,8	8.100	0,377				
130	487,9	601,6	8.100	0,199		129		
131	501,5	618,4	8.100	0,129				
132					8.110		131	130
133	1.692,9	1.225,4	14.000	0,163				
134	798,3	577,9	14.000	0,035				
135					13.815		133	134
136	49,0	230,4	2.100	0,174				
137	532,4	564,2	9.400	0,248				
138	788,4	835,5	9.400	0,048		137		
139	661,6	701,1	9.400	0,029				
140					9.437	114	139	138

Quadro B.1 - Características geométricas e seqüência de cálculo dos elementos da bacia do rio Pirapama pelo modelo Kineros2 (Continuação)

Elemento	Área (m <sup>2</sup> )	Comprimento do plano (m)	Largura do plano (m)	Declividade	Comprimento do canal (m)	Elemento anterior		
						Superior	Esquerda	Direita
141	37,1	263,7	1.400	0,151				
142	72,9	518,2	1.400	0,077				
143					1.407	104	142	141
144	161,0	362,2	4.400	0,110				
145	824,8	1.855,9	4.400	0,065		150		
146					4.444	108, 149	114	145
147	137,6	460,4	3.000	0,087				
148	156,9	524,9	3.000	0,076				
149					2.988		147	148
150	1.268,3	2.854,0	4.400	0,042				
151	166,6	349,2	4.800	0,344				
152	368,1	771,2	4.800	0,155				
153					4.772	143, 146	151	152
154	241,8	735,5	3.400	0,114				
155	393,9	1.212,4	3.400	0,069				
156					3.439	153, 140	154	155
159					1.802	224	268	267
160	573,5	1.259,5	4.600	0,063				
161	438,2	962,4	4.600	0,083		160		
162	338,7	743,9	4.600	0,054				
163					4.554	135	161	162
164	212,7	405,1	5.200	0,098				
165	584,8	1.114,0	5.200	0,036		164		

Quadro B.1 - Características geométricas e seqüência de cálculo dos elementos da bacia do rio Pirapama pelo modelo Kineros2 (Continuação)

Elemento	Área (m <sup>2</sup> )	Comprimento do plano (m)	Largura do plano (m)	Declividade	Comprimento do canal (m)	Elemento anterior		
						Superior	Esquerda	Direita
166	542,0	1.032,6	5.200	0,038				
167					5.249		165	166
168	236,9	1.093,7	2.200	0,036				
169	109,7	506,7	2.200	0,079				
170					2.166	132, 271	169	168
171	228,5	695,2	3.300	0,057				
172	253,9	772,3	3.300	0,052				
173					3.287	167, 170	172	171
174	804,6	1.421,4	5.700	0,056				
175	810,1	1.431,0	5.700	0,056				
176					5.661		174	175
177	457,4	807,9	5.700	0,148				
178	518,4	915,7	5.700	0,044				
179					5.661		177	178
180	308,1	671,6	4.600	0,059				
181	434,5	947,1	4.600	0,084		180		
182	403,9	880,3	4.600	0,045				
183					4.588		181	182
184	171,8	709,4	2.400	0,113				
185	183,9	759,2	2.400	0,053				
186					2.422	173, 176	185	184
187	1.011,9	959,2	11.000	0,009				
188	236,8	968,1	11.000	0,098				

Quadro B.1 - Características geométricas e seqüência de cálculo dos elementos da bacia do rio Pirapama pelo modelo Kineros2 (Continuação)

Elemento	Área (m <sup>2</sup> )	Comprimento do plano (m)	Largura do plano (m)	Declividade	Comprimento do canal (m)	Elemento anterior		
						Superior	Esquerda	Direita
189	257,0	382,0	11.000	0,090				
190					5.794		199	198
191	191,3	352,0	5.400	0,113				
192	407,7	750,0	5.400	0,053				
193					5.436		192	191
194	569,9	1.002,7	5.700	0,080				
195	304,9	536,5	5.700	0,149				
196					5.683	183, 193, 249	194	195
197	493,9	5.043,7	5.000	0,082		260		
198	354,8	703,5	5.000	0,114		187		
199					5.044		198	197
200	189,2	415,3	4.600	0,096				
201	209,6	460,3	4.600	0,174				
202					4.554		200	201
203	133,9	436,3	3.100	0,092				
204	146,6	477,8	3.100	0,084				
205					3.068	199, 202	203	204
206	329,8	1.647,1	2.000	0,044				
207	143,3	3.549,4	2.000	0,091		206		
208	62,6	1.114,4	2.300	0,098				
209	60,3	998,4	2.300	0,090				
210					2.072	159, 190	208	209
211	67,7	164,0	4.100	0,244		210	220	219
212	211,6	512,9	4.100	0,078		211		

Quadro B.1 - Características geométricas e seqüência de cálculo dos elementos da bacia do rio Pirapama pelo modelo Kineros2 (Continuação)

Elemento	Área (m <sup>2</sup> )	Comprimento do plano (m)	Largura do plano (m)	Declividade	Comprimento do canal (m)	Elemento anterior		
						Superior	Esquerda	Direita
213	195,6	474,2	4.100	0,084				
214					4.126		212	213
215	129,3	502,4	2.600	0,080				
216	210,3	817,0	2.600	0,098				
217					2.574	205, 214	216	217
218	487,2	2.121,0	2.300	0,019		218		
219	248,7	1.082,6	2.300	0,074				
220	83,9	365,2	2.300	0,109				
221					2.297			
222					500,0	217, 228, 211		
224					2.002,5	156, 163	207	225
225	1.115,3	1.637,3	2.000	0,024				
226	173,4	395,9	4.400	0,101				
227	226,7	517,4	4.400	0,077				
228					4.381		227	226
229	748,6	739,3	10.000	0,027				
230	382,2	377,5	10.000	0,106				
231	1.701,7	1.680,6	10.000	0,012		229		
232	803,7	793,7	10.000	0,050		230		
233					10.126		232	231
234	1.327,7	1.103,7	12.000	0,072				
235	785,7	653,1	12.000	0,122				
236					12.030	222	234	235
237	488,2	778,4	6.300	0,103				

Quadro B.1 - Características geométricas e seqüência de cálculo dos elementos da bacia do rio Pirapama pelo modelo Kineros2 (Continuação)

Elemento	Área (m <sup>2</sup> )	Comprimento do plano (m)	Largura do plano (m)	Declividade	Comprimento do canal (m)	Elemento anterior		
						Superior	Esquerda	Direita
238	293,4	467,8	6.300	0,171				
239					6.271		237	238
240	579,0	654,5	8.800	0,122				
241	323,7	365,9	8.800	0,218				
242					8.847		241	240
243	62,5	233,5	2.700	0,085				
244	224,0	837,5	2.700	0,024				
245					2.675	239, 196	244	243
246	181,0	732,1	2.500	0,027				
247	176,0	712,0	2.500	0,028				
248					2.472	245, 242	247	246
249					4.351	186, 179	262	261
250	434,7	851,6	5.100	0,023				
251	499,8	979,0	5.100	0,020				
252					5.105	248, 236	251	250
253	37,0	423,5	870	0,047				
254	22,5	257,7	870	0,078				
255					873		253	254
256	154,8	1.038,6	1.500	0,019				
257					1.491	252, 233	256	270
258	279,9	753,9	3.700	0,026		272		
259	110,9	298,7	3.700	0,067				
260	280,0	555,1	5.000	0,044				
261	322,3	740,8	4.400	0,054				

Quadro B.1 - Características geométricas e seqüência de cálculo dos elementos da bacia do rio Pirapama pelo modelo Kineros2 (Continuação)

Elemento	Área (m <sup>2</sup> )	Comprimento do plano (m)	Largura do plano (m)	Declividade	Comprimento do canal (m)	Elemento anterior		
						Superior	Esquerda	Direita
262	265,7	610,6	4.400	0,065				
263	1.268,3	3.177,6	4.000	0,050				
266					1.200			
267	91,1	1.450,6	8.400	0,090				
268	159,5	1.070,5	8.400	0,090				
270	80,5	540,1	1.500	0,037				
271					898	123, 126	127	121
272	344,3	927,1	3.700	0,021				
273					3.713	257, 255	258	259
274					2.126	83, 89	136	94

**APÊNDICE C**

LISTA DOS VALORES DOS PARÂMETROS CALIBRADOS  
PARA O MODELO KINEROS2

Quadro C.1 - Lista dos valores dos parâmetros calibrados pelo modelo Kineros2 dos elementos discretizados da bacia do rio Pirapama

Elemento	Parâmetros													
	<i>n</i>	<i>c<sub>f</sub></i>	<i>C</i>	<i>T</i>	<i>S<sub>i</sub></i>	<i>C<sub>o</sub></i>	<i>K<sub>s</sub></i>		<i>G</i>		$\phi$		<i>R<sub>o</sub></i>	
							Sup.	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	Inf.
1	0,08	50	1,0	300	0,4	0,5	2,2	1,8	20	16	0,32	0,24	0,01	0,01
2	0,06	50	1,0	300	0,4	0,5	2,2	1,8	20	16	0,32	0,24	0,01	0,01
4	0,06	50	1,0	300	0,4	0,5	2,2	1,8	20	16	0,32	0,24	0,01	0,01
5	0,06	50	1,0	300	0,7	0,5	2,2	1,8	20	16	0,32	0,24	0,01	0,01
7	0,06	50	1,0	300	0,4	0,5	2,2	1,8	20	16	0,32	0,24	0,01	0,01
8	0,06	50	1,0	300	0,4	0,5	2,2	1,8	20	16	0,32	0,24	0,01	0,01
10	0,06	50	1,0	300	0,4	0,5	2,2	1,8	20	16	0,32	0,24	0,01	0,01
12	0,06	50	1,0	300	0,4	0,5	2,2	1,8	20	16	0,32	0,24	0,01	0,01
13	0,06	50	1,0	300	0,4	0,5	2,2	1,8	20	16	0,32	0,24	0,01	0,01
14	0,06	50	1,0	300	0,4	0,5	2,2	1,8	20	16	0,32	0,24	0,01	0,01
16	0,06	50	1,0	300	0,4	0,5	2,2	1,8	20	16	0,32	0,24	0,01	0,01
17	0,06	50	1,0	300	0,4	0,5	2,2	1,8	20	16	0,32	0,24	0,01	0,01
19	0,06	50	1,0	300	0,4	0,5	2,2	1,8	20	16	0,32	0,24	0,01	0,01
20	0,06	50	1,0	300	0,4	0,5	2,2	1,8	20	16	0,32	0,24	0,01	0,01
22	0,06	50	1,0	300	0,4	0,5	2,2	1,8	20	16	0,32	0,24	0,01	0,01
23	0,06	50	1,0	300	0,4	0,5	2,2	1,8	20	16	0,32	0,24	0,01	0,01
24	0,06	50	1,0	300	0,4	0,5	2,2	1,8	20	16	0,32	0,24	0,01	0,01
25	0,06	50	1,0	300	0,4	0,5	2,2	1,8	20	16	0,32	0,24	0,01	0,01
27	0,06	50	1,0	300	0,4	0,5	2,2	1,8	20	16	0,32	0,24	0,01	0,01
28	0,06	50	1,0	300	0,4	0,5	2,2	1,8	20	16	0,32	0,24	0,01	0,01

Quadro C.1 - Lista dos valores dos parâmetros calibrados pelo modelo Kineros2 dos elementos discretizados da bacia do rio Pirapama (Continuação)

Elemento	Parâmetros													
	<i>n</i>	<i>c<sub>f</sub></i>	<i>C</i>	<i>T</i>	<i>S<sub>i</sub></i>	<i>C<sub>o</sub></i>	<i>K<sub>s</sub></i>		<i>G</i>		$\phi$		<i>R<sub>o</sub></i>	
							Sup.	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	Inf.
61	0,08	50	1,0	300	0,9	0,5	3,3	0,7	20	12	0,32	0,24	0,2	0,2
62	0,08	50	1,0	300	0,9	0,5	3,3	0,7	20	12	0,32	0,24	0,2	0,2
64	0,08	50	1,0	300	0,9	0,5	3,3	0,7	20	12	0,32	0,24	0,2	0,2
65	0,08	50	1,0	300	0,9	0,5	3,3	0,7	20	12	0,32	0,24	0,2	0,2
66	0,08	50	1,0	300	0,9	0,5	3,3	0,7	20	12	0,32	0,24	0,2	0,2
67	0,08	50	1,0	300	0,9	0,5	3,3	0,7	20	12	0,32	0,24	0,2	0,2
69	0,06	50	1,0	300	0,7	0,5	2,2	1,8	20	16	0,32	0,24	0,01	0,01
70	0,06	50	1,0	300	0,7	0,5	2,2	1,8	20	16	0,32	0,24	0,01	0,01
72	0,08	50	1,0	300	0,9	0,5	3,3	0,7	20	12	0,32	0,24	0,2	0,2
73	0,08	50	1,0	300	0,9	0,5	3,3	0,7	20	12	0,32	0,24	0,2	0,2
75	0,08	50	1,0	300	0,9	0,5	3,3	0,7	20	12	0,32	0,24	0,2	0,2
76	0,08	50	1,0	300	0,9	0,5	3,3	0,7	20	12	0,32	0,24	0,2	0,2
78	0,08	50	1,0	300	0,9	0,5	3,3	0,7	20	12	0,32	0,24	0,2	0,2
79	0,08	50	1,0	300	0,9	0,5	3,3	0,7	20	12	0,32	0,24	0,2	0,2
81	0,08	50	1,0	300	0,9	0,5	3,3	0,7	20	12	0,32	0,24	0,2	0,2
82	0,08	50	1,0	300	0,9	0,5	3,3	0,7	20	12	0,32	0,24	0,2	0,2
84	0,08	50	1,0	300	0,9	0,5	3,3	0,7	20	12	0,32	0,24	0,2	0,2
85	0,08	50	1,0	300	0,9	0,5	3,3	0,7	20	12	0,32	0,24	0,2	0,2
87	0,08	50	1,0	300	0,9	0,5	3,3	0,7	20	12	0,32	0,24	0,2	0,2

Quadro C.1 - Lista dos valores dos parâmetros calibrados pelo modelo Kineros2 dos elementos discretizados da bacia do rio Pirapama (Continuação)

Elemento	Parâmetros													
	<i>n</i>	<i>c<sub>f</sub></i>	<i>C</i>	<i>T</i>	<i>S<sub>i</sub></i>	<i>C<sub>o</sub></i>	<i>K<sub>s</sub></i>		<i>G</i>		$\phi$		<i>R<sub>o</sub></i>	
							Sup.	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	Inf.
88	0,08	50	1,0	300	0,9	0,5	3,3	0,7	20	12	0,32	0,24	0,2	0,2
90	0,08	50	1,0	300	0,9	0,5	3,3	0,7	20	12	0,32	0,24	0,2	0,2
90	0,08	50	1,0	300	0,9	0,5	3,3	0,7	20	12	0,32	0,24	0,2	0,2
91	0,08	50	1,0	300	0,9	0,5	3,3	0,7	20	12	0,32	0,24	0,2	0,2
93	0,08	50	1,0	300	0,9	0,5	3,3	0,7	20	12	0,32	0,24	0,2	0,2
94	0,08	50	1,0	300	0,9	0,5	3,3	0,7	20	12	0,32	0,24	0,2	0,2
95	0,08	50	1,0	300	0,9	0,5	3,3	0,7	20	12	0,32	0,24	0,2	0,2
96	0,08	50	1,0	300	0,9	0,5	3,3	0,7	20	12	0,32	0,24	0,2	0,2
97	0,08	50	1,0	300	0,9	0,5	3,3	0,7	20	12	0,32	0,24	0,2	0,2
99	0,08	50	1,0	300	0,9	0,5	3,3	0,7	20	12	0,32	0,24	0,2	0,2
100	0,08	50	1,0	300	0,9	0,5	3,3	0,7	20	12	0,32	0,24	0,2	0,2
102	0,08	50	1,0	300	0,9	0,5	3,3	0,7	20	12	0,32	0,24	0,2	0,2
103	0,08	50	1,0	300	0,9	0,5	3,3	0,7	20	12	0,32	0,24	0,2	0,2
105	0,08	50	1,0	300	0,9	0,5	3,3	0,7	20	12	0,32	0,24	0,2	0,2
106	0,08	50	1,0	300	0,9	0,5	3,3	0,7	20	12	0,32	0,24	0,2	0,2
107	0,08	50	1,0	300	0,9	0,5	3,3	0,7	20	12	0,32	0,24	0,2	0,2
109	0,08	50	1,0	300	0,9	0,5	3,3	0,7	20	12	0,32	0,24	0,2	0,2
110	0,08	50	1,0	300	0,9	0,5	3,3	0,7	20	12	0,32	0,24	0,2	0,2
112	0,08	50	1,0	300	0,9	0,5	3,3	0,7	20	12	0,32	0,24	0,2	0,2

Quadro C.1 - Lista dos valores dos parâmetros calibrados pelo modelo Kineros2 dos elementos discretizados da bacia do rio Pirapama (Continuação)

Elemento	Parâmetros													
	<i>n</i>	<i>c<sub>f</sub></i>	<i>C</i>	<i>T</i>	<i>S<sub>i</sub></i>	<i>C<sub>o</sub></i>	<i>K<sub>s</sub></i>		<i>G</i>		$\phi$		<i>R<sub>o</sub></i>	
							Sup.	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	Inf.
113	0,08	50	1,0	300	0,9	0,5	3,3	0,7	20	12	0,32	0,24	0,2	0,2
115	0,06	50	1,0	100	0,9	0,5	2,9	1,5	11	26	0,4	0,3	0,01	0,01
116	0,06	50	1,0	100	0,9	0,5	2,9	1,5	11	26	0,4	0,3	0,01	0,01
118	0,06	50	1,0	100	0,9	0,5	2,9	1,5	11	26	0,4	0,3	0,01	0,01
119	0,06	50	1,0	100	0,9	0,5	2,9	1,5	11	26	0,4	0,3	0,01	0,01
121	0,06	50	1,0	100	0,9	0,5	2,9	1,5	11	26	0,4	0,3	0,01	0,01
122	0,06	50	1,0	100	0,9	0,5	2,9	1,5	11	26	0,4	0,3	0,01	0,01
124	0,06	50	1,0	100	0,9	0,5	2,9	1,5	11	26	0,4	0,3	0,01	0,01
125	0,06	50	1,0	100	0,9	0,5	2,9	1,5	11	26	0,4	0,3	0,01	0,01
127	0,06	50	1,0	100	0,9	0,5	2,9	1,5	11	26	0,4	0,3	0,01	0,01
128	0,06	50	1,0	100	0,9	0,5	2,9	1,5	11	26	0,4	0,3	0,01	0,01
129	0,06	50	1,0	100	0,9	0,5	2,9	1,5	11	26	0,4	0,3	0,01	0,01
130	0,06	50	1,0	100	0,9	0,5	2,9	1,5	11	26	0,4	0,3	0,01	0,01
131	0,06	50	1,0	100	0,9	0,5	2,9	1,5	11	26	0,4	0,3	0,01	0,01
133	0,08	50	1,0	300	0,7	0,5	2,2	0,6	46	23	0,4	0,3	0,2	0,2
134	0,08	50	1,0	300	0,7	0,5	2,2	0,6	46	23	0,4	0,3	0,2	0,2
136	0,08	50	1,0	300	0,9	0,5	3,3	0,7	20	12	0,32	0,24	0,2	0,2
137	0,08	50	1,0	300	0,9	0,5	3,3	0,7	20	12	0,32	0,24	0,2	0,2
138	0,08	50	1,0	300	0,9	0,5	3,3	0,7	20	12	0,32	0,24	0,2	0,2

Quadro C.1 - Lista dos valores dos parâmetros calibrados pelo modelo Kineros2 dos elementos discretizados da bacia do rio Pirapama (Continuação)

Elemento	Parâmetros													
	<i>n</i>	<i>c<sub>f</sub></i>	<i>C</i>	<i>T</i>	<i>S<sub>i</sub></i>	<i>C<sub>o</sub></i>	<i>K<sub>s</sub></i>		<i>G</i>		$\phi$		<i>R<sub>o</sub></i>	
							Sup.	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	Inf.
139	0,08	50	1,0	300	0,9	0,5	3,3	0,7	20	12	0,32	0,24	0,2	0,2
141	0,08	50	1,0	300	0,9	0,5	3,3	0,7	20	12	0,32	0,24	0,2	0,2
142	0,08	50	1,0	300	0,9	0,5	3,3	0,7	20	12	0,32	0,24	0,2	0,2
144	0,08	50	1,0	300	0,9	0,5	3,3	0,7	20	12	0,32	0,24	0,2	0,2
145	0,08	50	1,0	300	0,9	0,5	3,3	0,7	20	12	0,32	0,24	0,2	0,2
147	0,08	50	1,0	300	0,9	0,5	3,3	0,7	20	12	0,32	0,24	0,2	0,2
148	0,08	50	1,0	300	0,9	0,5	3,3	0,7	20	12	0,32	0,24	0,2	0,2
150	0,08	50	1,0	300	0,9	0,5	3,3	0,7	20	12	0,32	0,24	0,2	0,2
151	0,08	50	1,0	300	0,9	0,5	3,3	0,7	20	12	0,32	0,24	0,2	0,2
152	0,08	50	1,0	300	0,9	0,5	2,6	0,7	11	12	0,1	0,24	0,01	0,2
154	0,08	50	1,0	300	0,9	0,5	3,3	0,7	20	12	0,32	0,24	0,2	0,2
155	0,08	50	1,0	300	0,9	0,5	3,3	0,7	20	12	0,32	0,24	0,2	0,2
160	0,08	50	1,0	300	0,7	0,5	2,2	0,6	46	23	0,4	0,3	0,2	0,2
161	0,08	50	1,0	300	0,7	0,5	2,2	0,6	46	23	0,4	0,3	0,2	0,2
162	0,08	50	1,0	300	0,7	0,5	2,2	0,6	46	23	0,4	0,3	0,2	0,2
164	0,06	50	1,0	100	0,9	0,5	2,9	1,5	11	26	0,4	0,3	0,01	0,01
165	0,06	50	1,0	100	0,9	0,5	2,9	1,5	11	26	0,4	0,3	0,01	0,01
166	0,06	50	1,0	100	0,9	0,5	2,9	1,5	11	26	0,4	0,3	0,01	0,01
168	0,06	50	1,0	100	0,9	0,5	2,9	1,5	11	26	0,4	0,3	0,01	0,01

Quadro C.1 - Lista dos valores dos parâmetros calibrados pelo modelo Kineros2 dos elementos discretizados da bacia do rio Pirapama (Continuação)

Elemento	Parâmetros													
	<i>n</i>	<i>c<sub>f</sub></i>	<i>C</i>	<i>T</i>	<i>S<sub>i</sub></i>	<i>C<sub>o</sub></i>	<i>K<sub>s</sub></i>		<i>G</i>		$\phi$		<i>R<sub>o</sub></i>	
							Sup.	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	Inf.
169	0,06	50	1,0	100	0,9	0,5	2,9	1,5	11	26	0,4	0,3	0,01	0,01
171	0,06	50	1,0	100	0,9	0,5	2,9	1,5	11	26	0,4	0,3	0,01	0,01
172	0,06	50	1,0	100	0,9	0,5	2,9	1,5	11	26	0,4	0,3	0,01	0,01
174	0,06	50	1,0	100	0,9	0,5	2,9	1,5	11	26	0,4	0,3	0,01	0,01
175	0,06	50	1,0	100	0,9	0,5	2,9	1,5	11	26	0,4	0,3	0,01	0,01
177	0,06	50	1,0	100	0,9	0,5	2,9	1,5	11	26	0,4	0,3	0,01	0,01
178	0,06	50	1,0	100	0,9	0,5	2,9	1,5	11	26	0,4	0,3	0,01	0,01
180	0,06	50	1,0	100	0,9	0,5	2,9	1,5	11	26	0,4	0,3	0,01	0,01
181	0,06	50	1,0	100	0,9	0,5	2,9	1,5	11	26	0,4	0,3	0,01	0,01
182	0,06	50	1,0	100	0,9	0,5	2,9	1,5	11	26	0,4	0,3	0,01	0,01
184	0,06	50	1,0	100	0,9	0,5	2,9	1,5	11	26	0,4	0,3	0,01	0,01
185	0,06	50	1,0	100	0,9	0,5	2,9	1,5	11	26	0,4	0,3	0,01	0,01
187	0,08	50	1,0	300	0,7	0,5	2,2	0,6	46	23	0,4	0,3	0,2	0,2
188	0,08	50	1,0	300	0,7	0,5	2,2	0,6	46	23	0,4	0,3	0,2	0,2
189	0,08	50	1,0	300	0,7	0,5	2,2	0,6	46	23	0,4	0,3	0,2	0,2
191	0,06	50	1,0	100	0,9	0,5	2,9	1,5	11	26	0,4	0,3	0,01	0,01
192	0,06	50	1,0	100	0,9	0,5	2,9	1,5	11	26	0,4	0,3	0,01	0,01
194	0,06	50	1,0	100	0,9	0,5	2,9	1,5	11	26	0,4	0,3	0,01	0,01
195	0,06	50	1,0	100	0,9	0,5	2,9	1,5	11	26	0,4	0,3	0,01	0,01
197	0,06	50	1,0	300	0,7	0,5	2,2	0,6	46	23	0,4	0,3	0,2	0,2

Quadro C.1 - Lista dos valores dos parâmetros calibrados pelo modelo Kineros2 dos elementos discretizados da bacia do rio Pirapama (Continuação)

Elemento	Parâmetros													
	<i>n</i>	<i>c<sub>f</sub></i>	<i>C</i>	<i>T</i>	<i>S<sub>i</sub></i>	<i>C<sub>o</sub></i>	<i>K<sub>s</sub></i>		<i>G</i>		$\phi$		<i>R<sub>o</sub></i>	
							Sup.	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	Inf.
198	0,06	50	1,0	300	0,7	0,5	2,2	0,6	46	23	0,4	0,3	0,2	0,2
200	0,06	50	1,0	300	0,7	0,5	2,2	0,6	46	23	0,4	0,3	0,2	0,2
201	0,06	50	1,0	300	0,7	0,5	2,2	0,6	46	23	0,4	0,3	0,2	0,2
203	0,06	50	1,0	300	0,7	0,5	2,2	0,6	46	23	0,4	0,3	0,2	0,2
204	0,06	50	1,0	300	0,7	0,5	2,2	0,6	46	23	0,4	0,3	0,2	0,2
206	0,08	50	1,0	300	0,7	0,5	2,2	0,6	46	23	0,4	0,3	0,2	0,2
207	0,08	50	1,0	300	0,7	0,5	2,2	0,6	46	23	0,4	0,3	0,2	0,2
208	0,08	50	1,0	300	0,7	0,5	2,2	0,6	46	23	0,4	0,3	0,2	0,2
209	0,08	50	1,0	300	0,7	0,5	2,2	0,6	46	23	0,4	0,3	0,2	0,2
211	0,06	50	1,0	300	0,7	0,5	2,2	0,6	46	23	0,4	0,3	0,2	0,2
212	0,06	50	1,0	300	0,7	0,5	2,2	0,6	46	23	0,4	0,3	0,2	0,2
213	0,06	50	1,0	300	0,7	0,5	2,2	0,6	46	23	0,4	0,3	0,2	0,2
215	0,06	50	1,0	300	0,7	0,5	2,2	0,6	46	23	0,4	0,3	0,2	0,2
216	0,06	50	1,0	300	0,7	0,5	2,2	0,6	46	23	0,4	0,3	0,2	0,2
218	0,06	50	1,0	300	0,7	0,5	2,2	0,6	46	23	0,4	0,3	0,2	0,2
219	0,06	50	1,0	300	0,7	0,5	2,2	0,6	46	23	0,4	0,3	0,2	0,2
220	0,06	50	1,0	300	0,7	0,5	2,2	0,6	46	23	0,4	0,3	0,2	0,2
225	0,08	50	1,0	300	0,7	0,5	2,2	0,6	46	23	0,4	0,3	0,2	0,2
226	0,06	50	1,0	300	0,7	0,5	2,2	0,6	46	23	0,4	0,3	0,2	0,2

Quadro C.1 - Lista dos valores dos parâmetros calibrados pelo modelo Kineros2 dos elementos discretizados da bacia do rio Pirapama (Continuação)

Elemento	Parâmetros													
	<i>n</i>	<i>c<sub>f</sub></i>	<i>C</i>	<i>T</i>	<i>S<sub>i</sub></i>	<i>C<sub>o</sub></i>	<i>K<sub>s</sub></i>		<i>G</i>		$\phi$		<i>R<sub>o</sub></i>	
							Sup.	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	Inf.
227	0,06	50	1,0	300	0,7	0,5	2,2	0,6	46	23	0,4	0,3	0,2	0,2
229	0,06	50	1,0	300	0,7	0,5	2,2	0,6	46	23	0,4	0,3	0,2	0,2
230	0,06	50	1,0	300	0,7	0,5	2,2	0,6	46	23	0,4	0,3	0,2	0,2
231	0,06	50	1,0	300	0,7	0,5	2,2	0,6	46	23	0,4	0,3	0,2	0,2
232	0,06	50	1,0	300	0,7	0,5	2,2	0,6	46	23	0,4	0,3	0,2	0,2
234	0,06	50	1,0	300	0,9	0,5	2,2	0,7	46	23	0,4	0,3	0,2	0,2
235	0,06	50	1,0	300	0,9	0,5	2,2	0,7	46	23	0,4	0,3	0,2	0,2
237	0,06	50	1,0	100	0,9	0,5	2,9	1,5	11	26	0,4	0,3	0,01	0,01
238	0,06	50	1,0	100	0,9	0,5	2,9	1,5	11	26	0,4	0,3	0,01	0,01
240	0,06	50	1,0	100	0,9	0,5	2,9	1,5	11	26	0,4	0,3	0,01	0,01
241	0,06	50	1,0	100	0,9	0,5	2,9	1,5	11	26	0,4	0,3	0,01	0,01
243	0,06	50	1,0	100	0,9	0,5	2,9	1,5	11	26	0,4	0,3	0,01	0,01
244	0,06	50	1,0	100	0,9	0,5	2,9	1,5	11	26	0,4	0,3	0,01	0,01
246	0,06	50	0,2	100	0,9	0,5	2,9	1,5	11	26	0,4	0,3	0,01	0,01
247	0,06	50	0,2	100	0,9	0,5	2,9	1,5	11	26	0,4	0,3	0,01	0,01
250	0,06	50	1,0	300	0,7	0,5	2,2	0,6	46	23	0,4	0,3	0,2	0,2
251	0,06	50	1,0	300	0,7	0,5	2,2	0,6	46	23	0,4	0,3	0,2	0,2
253	0,06	50	1,0	300	0,7	0,5	2,2	0,6	46	23	0,4	0,3	0,2	0,2
254	0,06	50	1,0	300	0,7	0,5	2,2	0,6	46	23	0,4	0,3	0,2	0,2

Quadro C.1 - Lista dos valores dos parâmetros calibrados pelo modelo Kineros2 dos elementos discretizados da bacia do rio Pirapama (Continuação)

Elemento	Parâmetros													
	<i>n</i>	<i>c<sub>f</sub></i>	<i>C</i>	<i>T</i>	<i>S<sub>i</sub></i>	<i>C<sub>o</sub></i>	<i>K<sub>s</sub></i>		<i>G</i>		$\phi$		<i>R<sub>o</sub></i>	
							Sup.	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	Inf.	Sup.	Inf.
256	0,06	50	1,0	300	0,7	0,5	2,2	0,6	46	23	0,4	0,3	0,2	0,2
258	0,06	50	1,0	300	0,7	0,5	2,2	0,6	46	23	0,4	0,3	0,2	0,2
259	0,06	50	1,0	300	0,7	0,5	2,2	0,6	46	23	0,4	0,3	0,2	0,2
260	0,06	50	1,0	300	0,7	0,5	2,2	0,6	46	23	0,4	0,3	0,2	0,2
261	0,06	50	1,0	100	0,9	0,5	2,9	1,5	11	26	0,4	0,3	0,01	0,01
262	0,06	50	1,0	100	0,9	0,5	2,9	1,5	11	26	0,4	0,3	0,01	0,01
263	0,08	50	1,0	300	0,9	0,5	3,3	0,7	20	12	0,32	0,24	0,2	0,2
267	0,08	50	1,0	300	0,7	0,5	2,2	0,6	46	23	0,4	0,3	0,2	0,2
268	0,08	50	1,0	300	0,7	0,5	2,2	0,6	46	23	0,4	0,3	0,2	0,2
270	0,06	50	1,0	300	0,7	0,5	2,2	0,6	46	23	0,4	0,3	0,2	0,2
272	0,06	50	1,0	300	0,7	0,5	2,2	0,6	46	23	0,4	0,3	0,2	0,2

## APÊNDICE D

### EROSÃO CALCULADA E PREVISTA PELO MODELO KINEROS2 A PARTIR DOS DADOS DO RSM PARA O POSTO PIRAPAMA

- |               |  |
|---------------|--|
| $P_p$ RSM     | – Precipitação média prevista pelas 10 simulações do RSM                       |
| $E_c P_o$     | – Erosão calculada com a precipitação observada                                |
| $E_c P_p$ RSM | – Erosão calculada com a precipitação média calculada com os 10 membros do RSM |

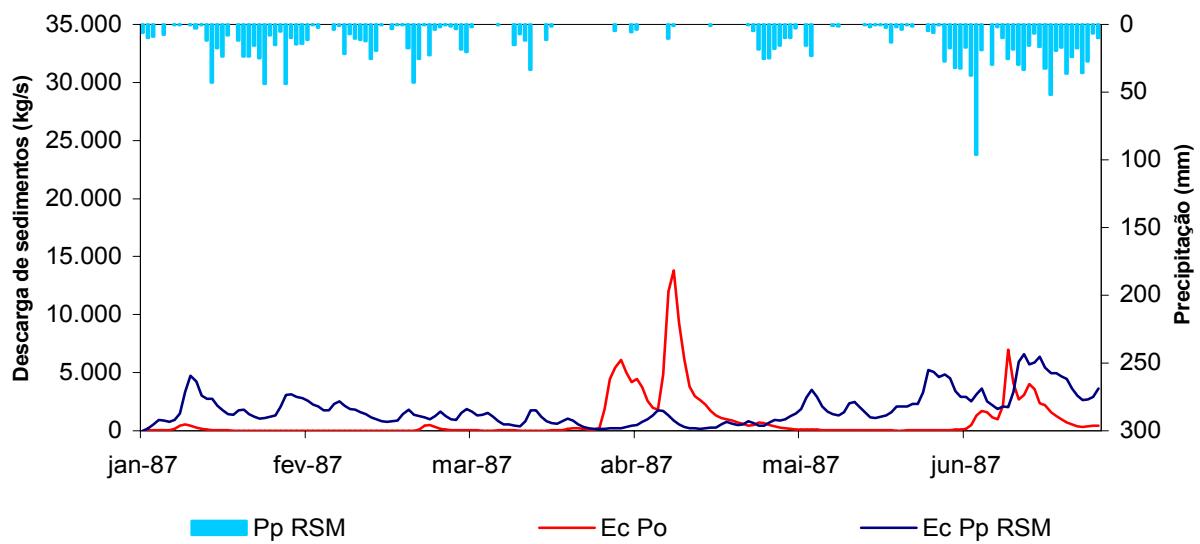


Figura D.1 - Hidrograma médio calculado com a precipitação prevista pelo RSM, e sedigramas calculados com a precipitação observada e com a precipitação média prevista pelo RSM para 1987.

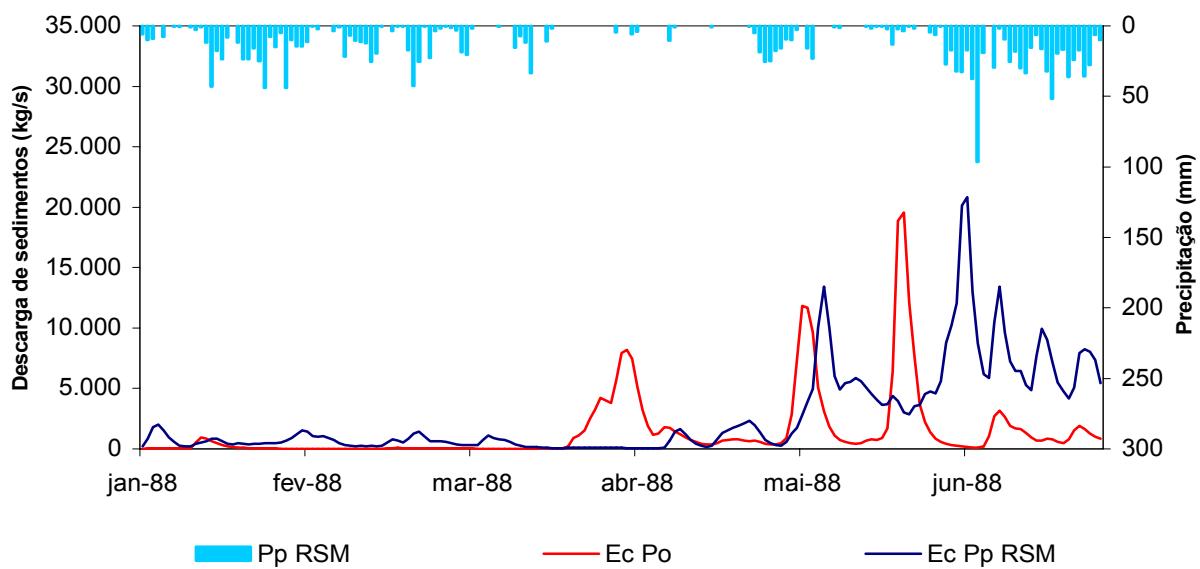


Figura D.2 - Hidrograma médio calculado com a precipitação prevista pelo RSM, e sedigramas calculados com a precipitação observada e com a precipitação média prevista pelo RSM para 1988.

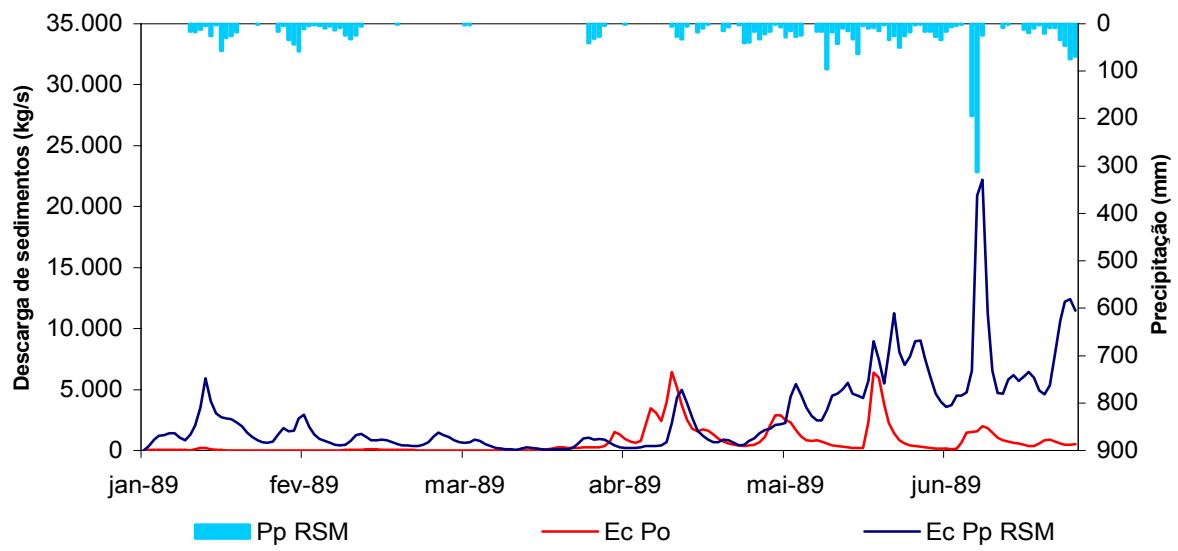


Figura D.3 - Hidrograma médio calculado com a precipitação prevista pelo RSM, e sedigramas calculados com a precipitação observada e com a precipitação média prevista pelo RSM para 1989.

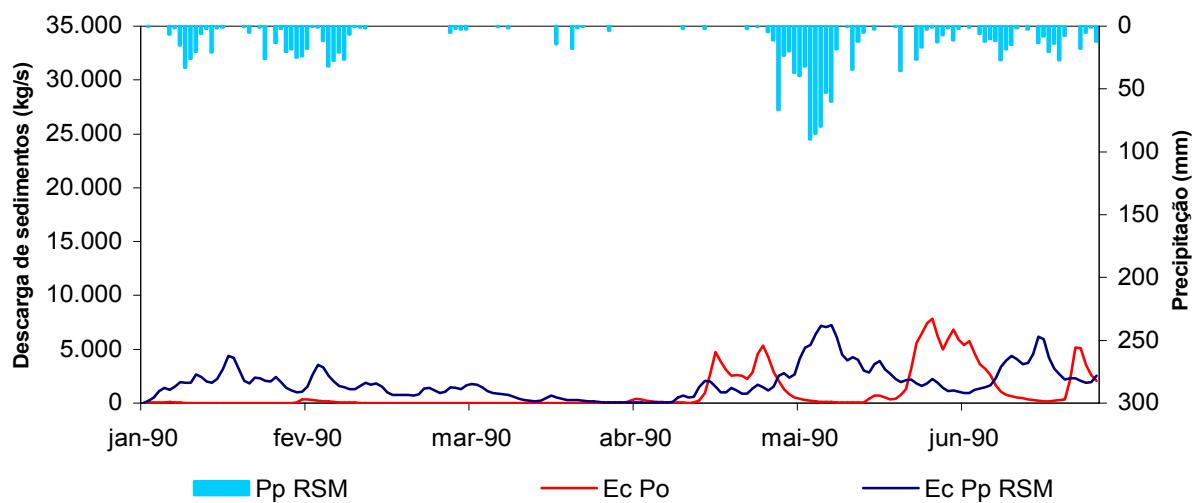


Figura D.4 - Hidrograma médio calculado com a precipitação prevista pelo RSM, e sedigramas calculados com a precipitação observada e com a precipitação média prevista pelo RSM para 1990.

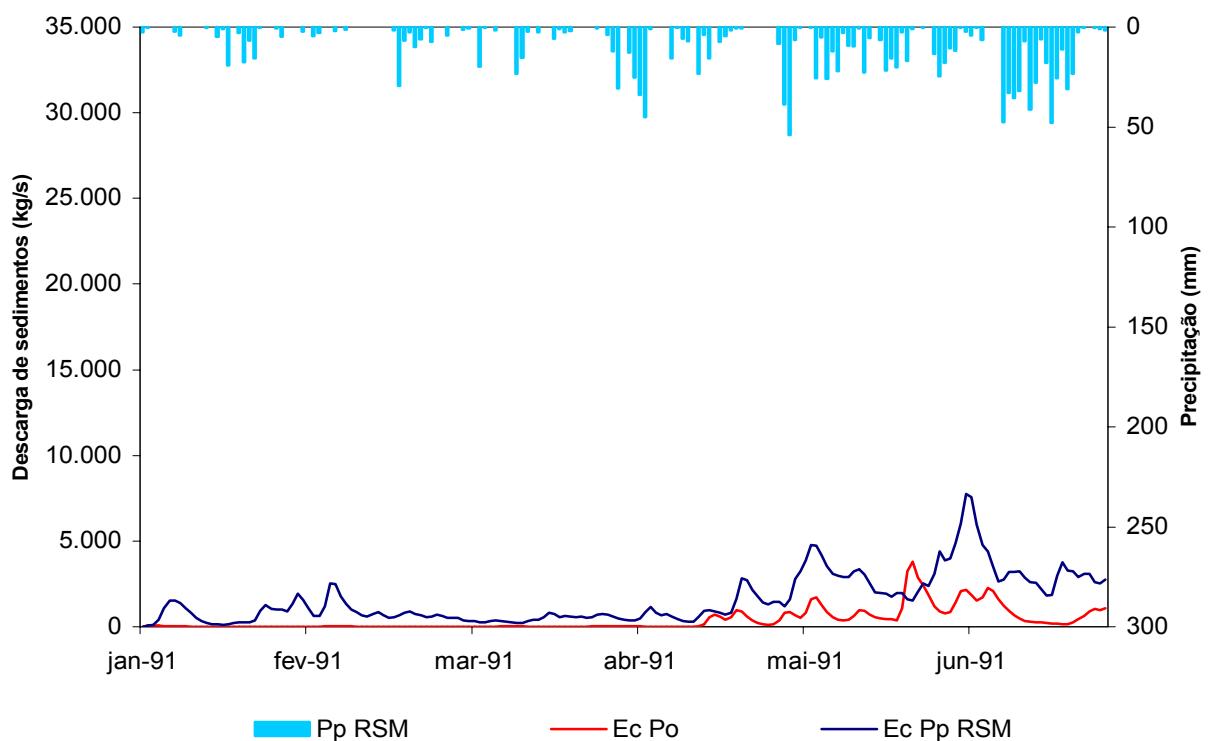


Figura D.5 - Hidrograma médio calculado com a precipitação prevista pelo RSM, e sedigramas calculados com a precipitação observada e com a precipitação média prevista pelo RSM para 1991.

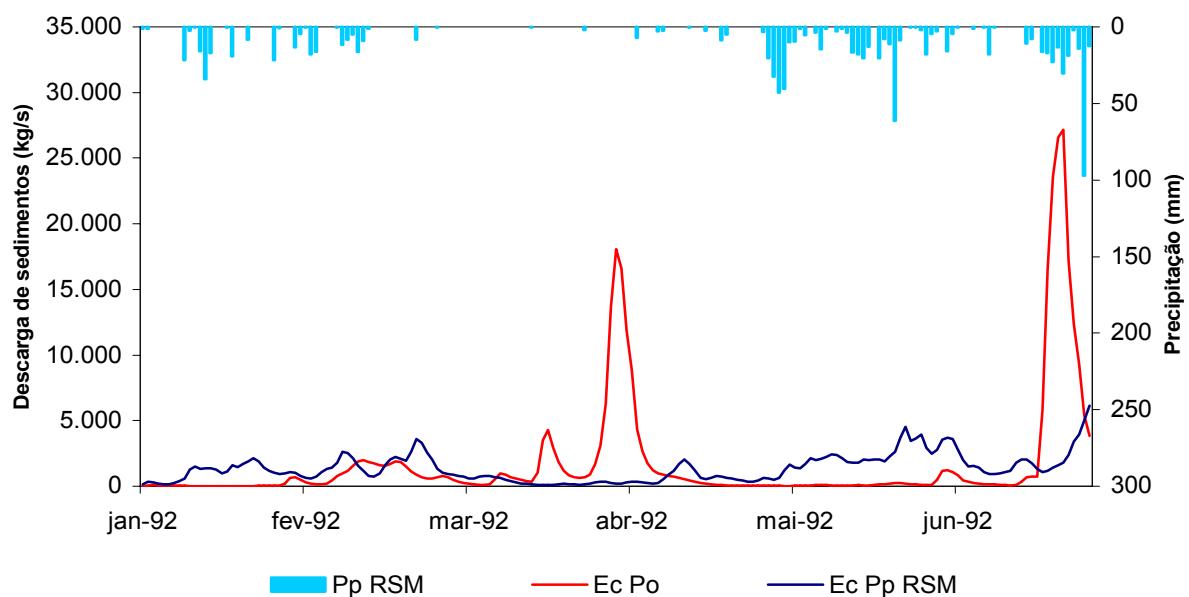


Figura D.6 - Hidrograma médio calculado com a precipitação prevista pelo RSM, e sedigramas calculados com a precipitação observada e com a precipitação média prevista pelo RSM para 1992.

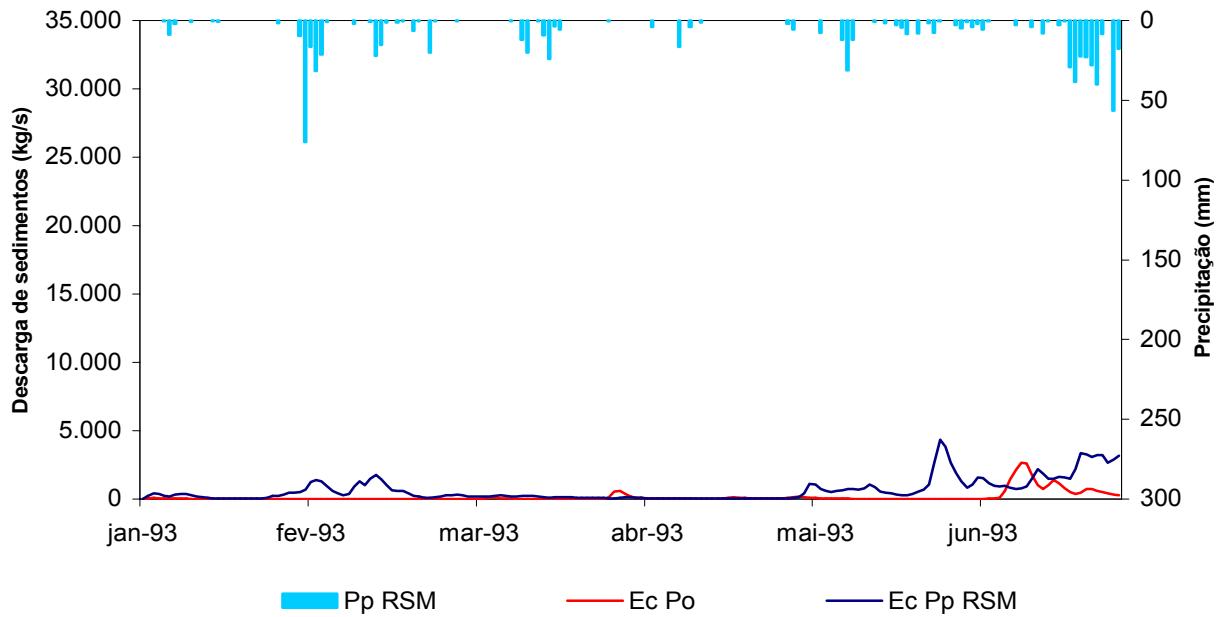


Figura D.7 - Hidrograma médio calculado com a precipitação prevista pelo RSM, e sedigramas calculados com a precipitação observada e com a precipitação média prevista pelo RSM para 1993.

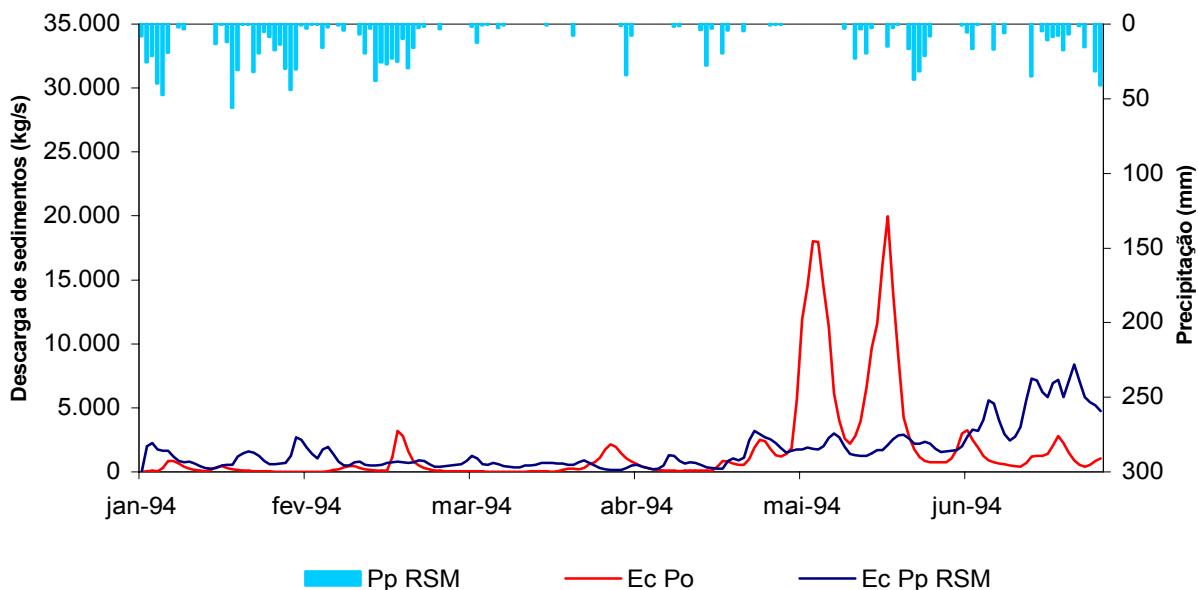


Figura D.8 - Hidrograma médio calculado com a precipitação prevista pelo RSM, e sedigramas calculados com a precipitação observada e com a precipitação média prevista pelo RSM para 1994.

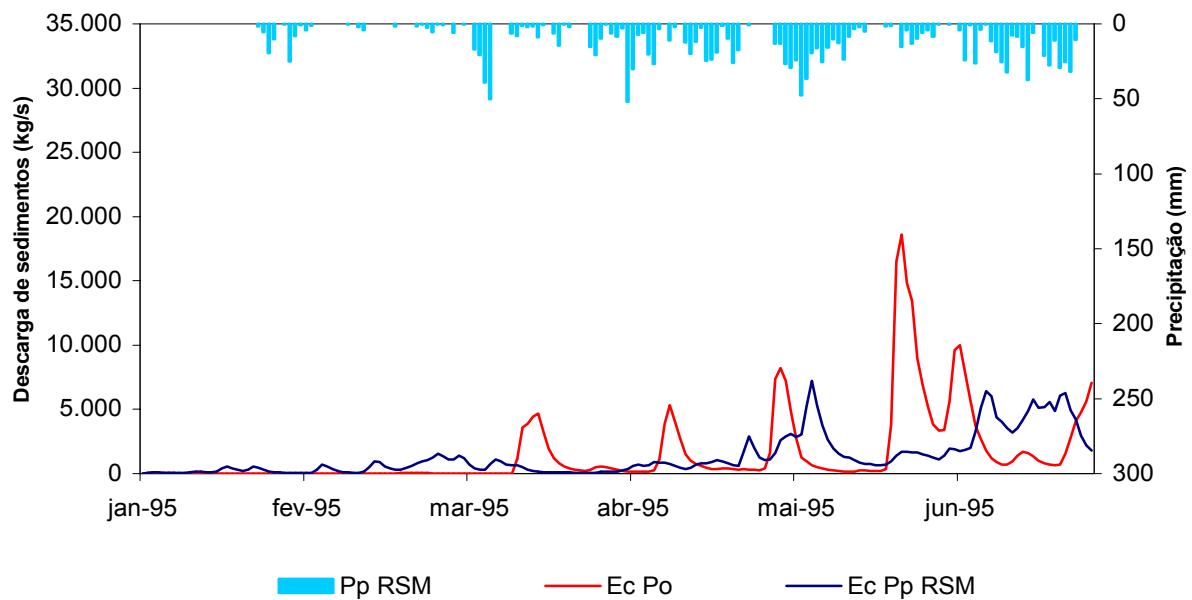


Figura D.9 - Hidrograma médio calculado com a precipitação prevista pelo RSM, e sedigramas calculados com a precipitação observada e com a precipitação média prevista pelo RSM para 1995.

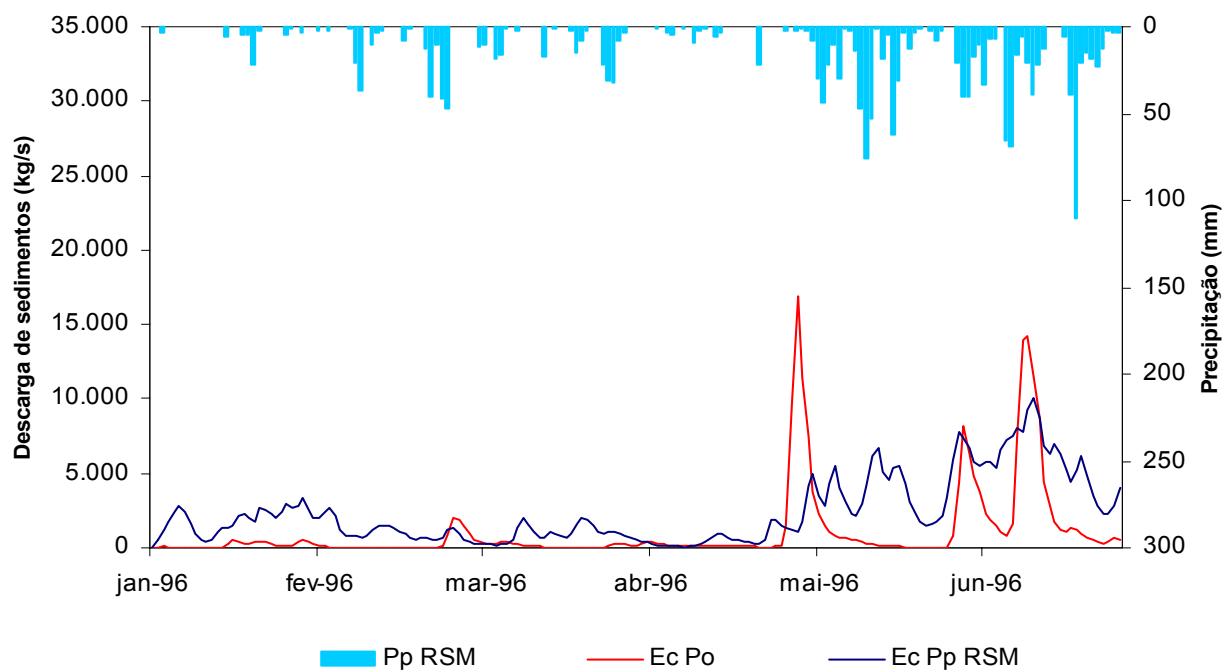


Figura D.10 - Hidrograma médio calculado com a precipitação prevista pelo RSM, e sedigramas calculados com a precipitação observada e com a precipitação média prevista pelo RSM para 1996.

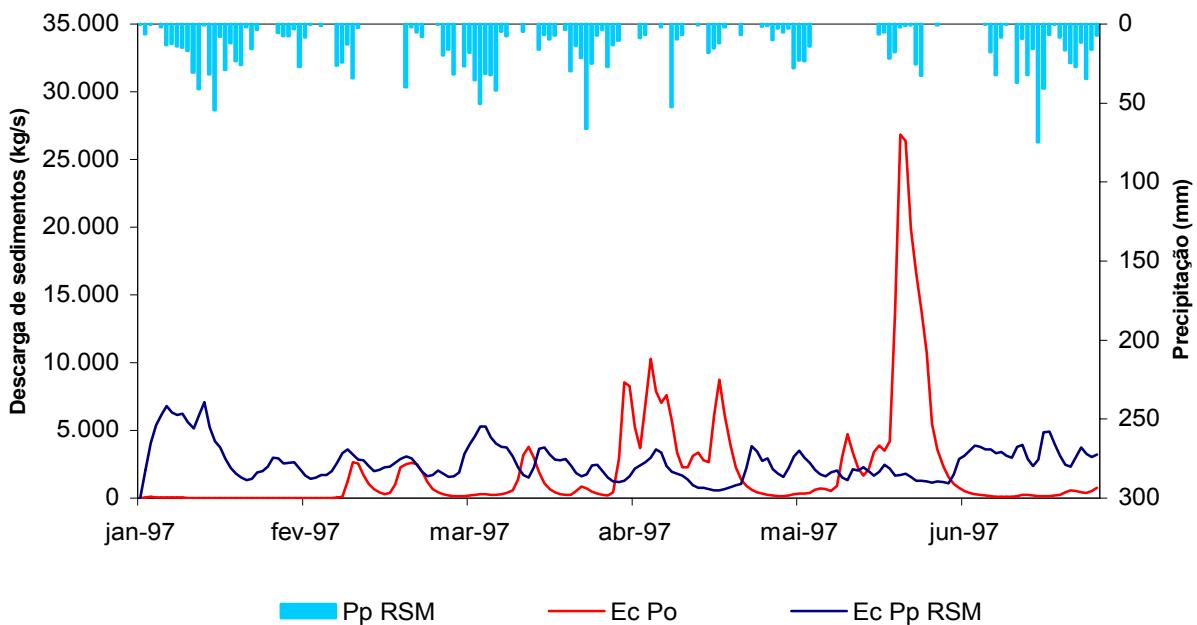


Figura D.11 - Hidrograma médio calculado com a precipitação prevista pelo RSM, e sedigramas calculados com a precipitação observada e com a precipitação média prevista pelo RSM para 1997.

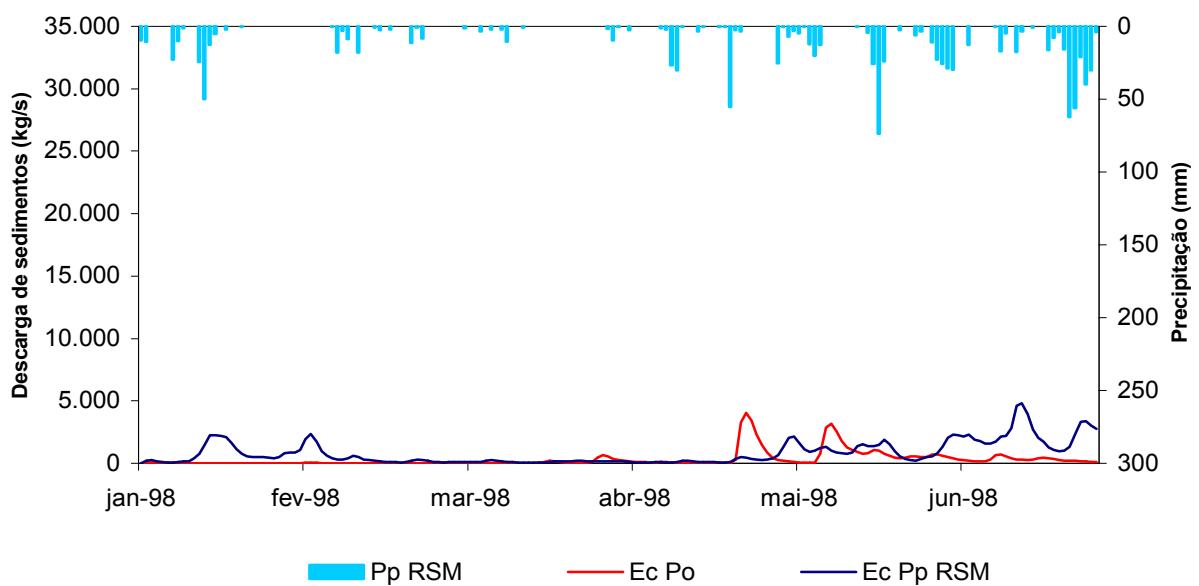


Figura D.12 - Hidrograma médio calculado com a precipitação prevista pelo RSM, e sedigramas calculados com a precipitação observada e com a precipitação média prevista pelo RSM para 1998.

