



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL,**  
**ARQUITETURA E URBANISMO**

**AVALIAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DA CHUVA NAS  
VAZÕES MÁXIMAS URBANAS USANDO DADOS DE  
RADAR E DE PLUVIÓGRAFO**

**ELAINE FRANCO DE CAMPOS**

**Campinas – SP**  
**2009**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E**  
**URBANISMO**

**ELAINE FRANCO DE CAMPOS**

**AVALIAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DA CHUVA NAS**  
**VAZÕES MÁXIMAS URBANAS USANDO DADOS DE**  
**RADAR E DE PLUVIÓGRAFO**

Dissertação de Mestrado apresentada à Comissão de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, na Área de Concentração de Recursos Hídricos, Energéticos e Ambientais.

**ORIENTADOR: Prof. Dr. ABEL MAIA GENOVEZ**

Campinas, SP  
2009

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE - UNICAMP

C157a Campos, Elaine Franco de  
Avaliação da distribuição da chuva nas vazões  
máximas urbanas usando dados de radar e de pluviógrafo  
/ Elaine Franco de Campos. --Campinas, SP: [s.n.], 2009.

Orientador: Abel Maia Genovez.  
Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual de  
Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e  
Urbanismo.

1. Hidrologia - Modelos. 2. Radar meteorológico. 3.  
Bacias hidrográficas. 4. Drenagem. I. Genovez, Abel  
Maia. II. Universidade Estadual de Campinas.  
Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e  
Urbanismo. III. Título.

Título em Inglês: Rainfall distribution evaluation in the urban peaks discharges  
using radar and rain gauge data

Palavras-chave em Inglês: Hydrology - Models, Weather Radar, Watersheds,  
Drainage

Área de concentração: Recursos Hídricos, Energéticos e Ambientais

Titulação: Mestre em Engenharia Civil

Banca examinadora: José Anderson do Nascimento Batista, José Teixeira Filho

Data da defesa: 15/07/2009

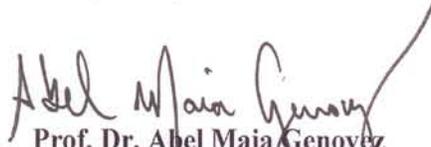
Programa de Pós Graduação: Engenharia Civil

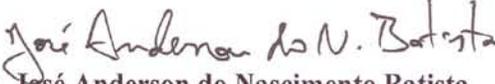
**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E**  
**URBANISMO**

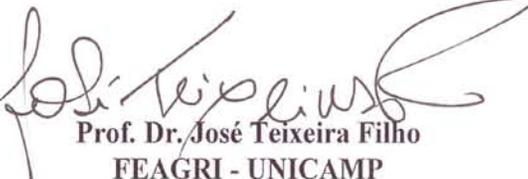
**AVALIAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DA CHUVA NAS**  
**VAZÕES MÁXIMAS URBANAS USANDO DADOS DE**  
**RADAR E DE PLUVIÓGRAFO**

**ELAINE FRANCO DE CAMPOS**

Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:

  
**Prof. Dr. Abel Maia Genovez**  
**Presidente e Orientador FEC - UNICAMP**

  
**Prof. Dr. José Anderson do Nascimento Batista**  
**FEC - UNICAMP**

  
**Prof. Dr. José Teixeira Filho**  
**FEAGRI - UNICAMP**

Campinas, 15 de julho de 2009

## DEDICATÓRIA

*Dedico este trabalho ao meu querido esposo  
Fábio, pelo amor, carinho, compreensão e apoio.*

## AGRADECIMENTOS

*Este trabalho não poderia ser terminado sem a ajuda de diversas pessoas às quais presto minha homenagem:*

*Aos meus pais Orides Franco de Campos e Fátima Figueiredo de Campos, pelos longos anos de investimento, incentivo e apoio, aos quais devo minha formação.*

*Às minhas irmãs, Alexssandra e Viviane Franco de Campos, pelo incentivo em todos os momentos da minha vida.*

*Aos meus queridos sogros Durval e Hedda Pereira pelo apoio, incentivo e atenção dispensada.*

*Ao meu orientador Prof. Dr. Abel Maia Genovez, da Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da UNICAMP, que me mostrou os caminhos a serem seguidos.*

*Ao Professor Dr. Augusto José Pereira Filho, do Departamento de Ciências Atmosféricas do Instituto Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (IAG – USP) pela disponibilidade em repassar dados úteis no desenvolvimento deste trabalho e pela consultoria sobre a análise dos dados de radar meteorológico.*

*Aos meus amigos de mestrado, Heloísa Souza, Rosemara Pereira e Rodrigo Gumiel.*

*A todos os professores e colegas do departamento, em especial ao amigo Marcelo Balbino da Silva do Laboratório de Hidrologia da FEC - UNICAMP, que ajudaram de forma direta e indireta na conclusão deste trabalho.*

*"A melhor de todas as coisas é aprender. O dinheiro pode ser perdido ou roubado, a saúde e força podem falhar, mas o que você dedicou à sua mente é seu para sempre."*

*(Louis L. Amour)*

*"Estudar as manifestações da natureza é trabalho que agrada a Deus. É o mesmo que rezar, que orar. Procurando conhecer as leis naturais, glorificando o primeiro inventor, o artista do Universo, se aprende a amá-lo, pois que um grande amor a Deus nasce de um grande saber."*

*(Leonardo da Vinci)*

## RESUMO

CAMPOS, Elaine Franco de, **Avaliação da distribuição da chuva nas vazões máximas urbanas usando dados de radar e de pluviógrafo**. Campinas: Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, UNICAMP, 2009. 170p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, UNICAMP, 2009.

A precipitação é um componente do ciclo hidrológico que apresenta grande variabilidade espacial. Postos pluviométricos fornecem registros válidos apenas para um pequeno entorno do instrumento. A baixa densidade e as curtas séries de dados dos postos pluviométricos em bacias brasileiras tem sido fatores determinante nas incertezas dos resultados de diversos modelos hidrológicos que têm sido aplicados no país. Nesse contexto, o estudo de estimativas espaciais de precipitação podem ser extremamente úteis na busca de hidrogramas de projeto. Essas estimativas, embora a precariedade dos dados observados, devem fornecer uma boa noção da distribuição espacial das chuvas.

Assim, com este trabalho, utilizam-se as estimativas da distribuição espacial da precipitação, obtidas a partir de dados de radar meteorológico, que são comparados aos dados da rede pluviométrica. Os dados da distribuição espacial da precipitação são usados como dados de entrada do modelo hidrológico distribuído *Storm Water Management Model* (SWMM), o qual foi aplicado a uma pequena bacia urbana da cidade de Campinas – SP, com área de drenagem de 7,59 km<sup>2</sup>. Os resultados são analisados comparando os hidrogramas simulados com os observados.

Foram realizados estudos de caso na Bacia Hidrográfica Ralph Stettinger pertencente à Bacia do Ribeirão das Anhumas, na cidade de Campinas, estado de São Paulo, Brasil, que conta com boa rede pluviométrica para aferir as estimativas da distribuição espacial da chuva e com dados pluviométricos de várias enchentes ocorridas na bacia. Os dados de radar utilizados foram os do radar meteorológico localizado na cidade de São Paulo.

A precipitação acumulada estimada pelo radar meteorológico para os nove eventos representou satisfatoriamente a chuva, quando comparados com os valores medidos nas estações pluviográficas, na qual, as diferenças obtiveram valor médio de 28%. Os hidrogramas resultantes da aplicação dos dados de radar reproduziram resultados satisfatórios se comparados aos resultados gerados pelo uso de dados de pluviógrafos, pois o coeficiente de eficiência obtido usando dados de radar foi de 0,69, já o coeficiente de eficiência encontrado usando dados de pluviógrafos foi de 0,85.

Palavras Chave: Hidrologia - Modelos; radar meteorológico; bacias hidrográficas; drenagem.



## ABSTRACT

CAMPOS, Elaine Franco de, **Rainfall distribution evaluation in the urban peak discharges using radar and rain gauge data**. Campinas: Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, UNICAMP, 2009. 170p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, UNICAMP, 2009.

The precipitation is one variable of the hydrological cycle that shows a large spatial variability. Conventional rain gauges only provide valid records from the positions next to the instrument. The low density of rainfall data recording posts in Brazilian watersheds has been the determinant factor of the uncertainties on the results of various hydrological models that have been applied in this country. In this context, the study of spatial estimates of precipitation can be extremely useful to find more accurate hydrographs of projects. These estimates, despite these poor data observed, may provide a good knowledge of the spatial rain distribution at the environment.

With this study, the estimates of the spatial distribution of precipitation, using a weather radar, may be compared with the rainfall data from the recording stations. The data of the spatial distribution of precipitation is used as an input at the distributed hydrological model “Storm Water Management Model (SWMM)”, which was applied to a urban watershed in the city Campinas - SP, with a drainage area in about 7,59 km<sup>2</sup>. The results are analyzed by comparing the simulated hydrographs to observed flow rates.

Studies of case were made in the watershed Ralph Stettinger belonging to Ribeirão das Anhumas watershed, which has a good pluviometric record to measure the estimates of the spatial distribution of rainfall and with fluviometric data from several flooding, occurred in this watershed. The radar data used was from the weather radar located in the city of São Paulo.

The accumulated precipitation that the weather radar predicted for the nine events, represented the rain as well when compared with the values already measured in the rain gauges, which the average value differences was 28%. The resultant hydrographs of the application of radar data reproduced satisfactory results if compared to the generated results by the rain gauges, because the obtained efficiency coefficient using radar data was 0,69, otherwise, the efficiency coefficient that was found using rain gauges data was 0,85.

Keywords: Hydrology - models; weather radar; watersheds; drainage.



## LISTA DE FIGURAS

Página

FIGURA 3.1: RELAÇÃO ENTRE OS BLOCOS ESTRUTURAIS DO SWMM. FONTE: (HUBER E DICKINSON, 1992). .....	37
FIGURA 4.1: LOCALIZAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIBEIRÃO DAS ANHUMAS E OS LIMITES DOS MUNICÍPIOS. A BACIA ABRANGE PARTE DO MUNICÍPIO DE PAULÍNIA E A MAIORIA ESTÁ NO MUNICÍPIO DE CAMPINAS. FONTE:(SEPLAMA, 2007).....	45
FIGURA 4.2: MAPA PLANIALTIMÉTRICO DA ÁREA DA BACIA EM ESTUDO, RALPH STETTINGER. FONTE: (TORRES <i>ET AL.</i> , 2006).....	48
FIGURA 4.3: MAPA PEDOLÓGICO DA ÁREA DA BACIA EM ESTUDO, RALPH STETTINGER. FONTE: (TORRES <i>ET AL.</i> , 2006).....	48
FIGURA 4.4: MAPA DE USO E OCUPAÇÃO DO SOLO DA ÁREA DA BACIA EM ESTUDO, RALPH STETTINGER. FONTE: (TORRES <i>ET AL.</i> , 2006).....	49
FIGURA 4.5: LOCALIZAÇÃO DOS POSTOS PLUVIOGRÁFICOS E FLUVIOGRÁFICO E GRIDE DO RADAR NA BACIA HIDROGRÁFICA RALPH STETTINGER.....	53
FIGURA 5.1: HIETOGRAMA COMPARANDO A PRECIPITAÇÃO MEDIDA POR PLUVIÓGRAFOS COM A ESTIMADA POR RADAR METEOROLÓGICO. ....	68
FIGURA 5.2: HIETOGRAMA COMPARANDO A PRECIPITAÇÃO MEDIDA POR PLUVIÓGRAFOS COM A ESTIMADA POR RADAR METEOROLÓGICO. ....	68
FIGURA 5.3: HIETOGRAMA COMPARANDO A PRECIPITAÇÃO MEDIDA POR PLUVIÓGRAFOS COM A ESTIMADA POR RADAR METEOROLÓGICO. ....	69
FIGURA 5.4: HIETOGRAMA COMPARANDO A PRECIPITAÇÃO MEDIDA POR PLUVIÓGRAFOS COM A ESTIMADA POR RADAR METEOROLÓGICO. ....	69
FIGURA 5.5: HIETOGRAMA COMPARANDO A PRECIPITAÇÃO MEDIDA POR PLUVIÓGRAFOS COM A ESTIMADA POR RADAR METEOROLÓGICO. ....	70
FIGURA 5.6: HIETOGRAMA COMPARANDO A PRECIPITAÇÃO MEDIDA POR PLUVIÓGRAFOS COM A ESTIMADA POR RADAR METEOROLÓGICO. ....	70
FIGURA 5.7: HIETOGRAMA COMPARANDO A PRECIPITAÇÃO MEDIDA POR PLUVIÓGRAFOS COM A ESTIMADA POR RADAR METEOROLÓGICO. ....	71
FIGURA 5.8: HIETOGRAMA COMPARANDO A PRECIPITAÇÃO MEDIDA POR PLUVIÓGRAFOS COM A ESTIMADA POR RADAR METEOROLÓGICO. ....	71
FIGURA 5.9: HIETOGRAMA COMPARANDO A PRECIPITAÇÃO MEDIDA POR PLUVIÓGRAFOS COM A ESTIMADA POR RADAR METEOROLÓGICO. ....	72
FIGURA 5.10: CURVA CHAVE DO POSTO FLUVIOMÉTRICO LOCALIZADO NA PRAÇA RALPH STETTINGER. ....	77
FIGURA 5.11: BACIA HIDROGRÁFICA RALPH STETTINGER COM DISCRETIZAÇÃO DETALHADA EM SEIS SUB-BACIAS.....	79
FIGURA 5.12: BACIA HIDROGRÁFICA RALPH STETTINGER COM DISCRETIZAÇÃO SIMPLIFICADA EM UMA SUB-BACIA. ...	80
FIGURA 5.13: EVENTO DO DIA 20-05-2005, PARA DISCRETIZAÇÃO DETALHADA (6 SUB-BACIAS), USANDO DADOS DE PRECIPITAÇÃO OBTIDOS POR PLUVIÓGRAFOS. ....	85
FIGURA 5.14: EVENTO DO DIA 24-01-2006, PARA DISCRETIZAÇÃO DETALHADA (6 SUB-BACIAS), USANDO DADOS DE PRECIPITAÇÃO OBTIDOS POR PLUVIÓGRAFOS. ....	85
FIGURA 5.15: EVENTO DO DIA 28-01-2006, PARA DISCRETIZAÇÃO DETALHADA (6 SUB-BACIAS), USANDO DADOS DE PRECIPITAÇÃO OBTIDOS POR PLUVIÓGRAFOS. ....	86

FIGURA 5.16: EVENTO DO DIA 21-02-2006, PARA DISCRETIZAÇÃO DETALHADA (6 SUB-BACIAS), USANDO DADOS DE PRECIPITAÇÃO OBTIDOS POR PLUVIÓGRAFOS. ....	86
FIGURA 5.17: EVENTO DO DIA 04-03-2006, PARA DISCRETIZAÇÃO DETALHADA (6 SUB-BACIAS), USANDO DADOS DE PRECIPITAÇÃO OBTIDOS POR PLUVIÓGRAFOS. ....	87
FIGURA 5.18: EVENTO DO DIA 20-05-2005, PARA DISCRETIZAÇÃO SIMPLIFICADA (1 SUB-BACIA), USANDO DADOS DE PRECIPITAÇÃO OBTIDOS POR PLUVIÓGRAFOS. ....	87
FIGURA 5.19: EVENTO DO DIA 24-01-2006, PARA DISCRETIZAÇÃO SIMPLIFICADA (1 SUB-BACIA), USANDO DADOS DE PRECIPITAÇÃO OBTIDOS POR PLUVIÓGRAFOS. ....	88
FIGURA 5.20: EVENTO DO DIA 28-01-2006, PARA DISCRETIZAÇÃO SIMPLIFICADA (1 SUB-BACIA), USANDO DADOS DE PRECIPITAÇÃO OBTIDOS POR PLUVIÓGRAFOS. ....	88
FIGURA 5.21: EVENTO DO DIA 21-02-2006, PARA DISCRETIZAÇÃO SIMPLIFICADA (1 SUB-BACIA), USANDO DADOS DE PRECIPITAÇÃO OBTIDOS POR PLUVIÓGRAFOS. ....	89
FIGURA 5.22: EVENTO DO DIA 04-03-2006, PARA DISCRETIZAÇÃO SIMPLIFICADA (1 SUB-BACIA), USANDO DADOS DE PRECIPITAÇÃO OBTIDOS POR PLUVIÓGRAFOS. ....	89
FIGURA 5.23: INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DO MÓDULO RUNOFF NA VAZÃO DE PICO. ....	94
FIGURA 5.24: INFLUÊNCIA DOS PARÂMETROS DO MÓDULO RUNOFF NO VOLUME ESCOADO. ....	95
FIGURA 5.25: EVENTO DO DIA 01-11-2006, PARA DISCRETIZAÇÃO DETALHADA (6 SUB-BACIAS), USANDO DADOS DE PRECIPITAÇÃO OBTIDOS POR PLUVIÓGRAFOS. ....	97
FIGURA 5.26: EVENTO DO DIA 26-12-2006, PARA DISCRETIZAÇÃO DETALHADA (6 SUB-BACIAS), USANDO DADOS DE PRECIPITAÇÃO OBTIDOS POR PLUVIÓGRAFOS. ....	98
FIGURA 5.27: EVENTO DO DIA 27-12-2006, PARA DISCRETIZAÇÃO DETALHADA (6 SUB-BACIAS), USANDO DADOS DE PRECIPITAÇÃO OBTIDOS POR PLUVIÓGRAFOS. ....	98
FIGURA 5.28: EVENTO DO DIA 12-01-2007, PARA DISCRETIZAÇÃO DETALHADA (6 SUB-BACIAS), USANDO DADOS DE PRECIPITAÇÃO OBTIDOS POR PLUVIÓGRAFOS. ....	99
FIGURA 5.29: EVENTO DO DIA 01-11-2006, PARA DISCRETIZAÇÃO SIMPLIFICADA (1 SUB-BACIA), USANDO DADOS DE PRECIPITAÇÃO OBTIDOS POR PLUVIÓGRAFOS. ....	99
FIGURA 5.30: EVENTO DO DIA 26-12-2006, PARA DISCRETIZAÇÃO SIMPLIFICADA (1 SUB-BACIA), USANDO DADOS DE PRECIPITAÇÃO OBTIDOS POR PLUVIÓGRAFOS. ....	100
FIGURA 5.31 : EVENTO DO DIA 27-12-2006, PARA DISCRETIZAÇÃO SIMPLIFICADA (1 SUB-BACIA), USANDO DADOS DE PRECIPITAÇÃO OBTIDOS POR PLUVIÓGRAFOS. ....	100
FIGURA 5.32: EVENTO DO DIA 12-01-2007, PARA DISCRETIZAÇÃO SIMPLIFICADA (1 SUB-BACIA), USANDO DADOS DE PRECIPITAÇÃO OBTIDOS POR PLUVIÓGRAFOS. ....	101
FIGURA 5.33: EVENTO DO DIA 01-11-2006, PARA DISCRETIZAÇÃO DETALHADA (6 SUB-BACIAS), USANDO DADOS DE PRECIPITAÇÃO OBTIDOS POR RADAR METEOROLÓGICO. ....	102
FIGURA 5.34: EVENTO DO DIA 26-12-2006, PARA DISCRETIZAÇÃO DETALHADA (6 SUB-BACIAS), USANDO DADOS DE PRECIPITAÇÃO OBTIDOS POR RADAR METEOROLÓGICO. ....	103
FIGURA 5.35: EVENTO DO DIA 27-12-2006, PARA DISCRETIZAÇÃO DETALHADA (6 SUB-BACIAS), USANDO DADOS DE PRECIPITAÇÃO OBTIDOS POR RADAR METEOROLÓGICO. ....	103
FIGURA 5.36: EVENTO DO DIA 12-01-2007, PARA DISCRETIZAÇÃO DETALHADA (6 SUB-BACIAS), USANDO DADOS DE PRECIPITAÇÃO OBTIDOS POR RADAR METEOROLÓGICO. ....	104
FIGURA 5.37: EVENTO DO DIA 01-11-2006, PARA DISCRETIZAÇÃO SIMPLIFICADA (1 SUB-BACIA), USANDO DADOS DE PRECIPITAÇÃO OBTIDOS POR RADAR METEOROLÓGICO. ....	104
FIGURA 5.38: EVENTO DO DIA 26-12-2006, PARA DISCRETIZAÇÃO SIMPLIFICADA (1 SUB-BACIA), USANDO DADOS DE PRECIPITAÇÃO OBTIDOS POR RADAR METEOROLÓGICO. ....	105
FIGURA 5.39: EVENTO DO DIA 27-12-2006, PARA DISCRETIZAÇÃO SIMPLIFICADA (1 SUB-BACIA), USANDO DADOS DE PRECIPITAÇÃO OBTIDOS POR RADAR METEOROLÓGICO. ....	105
FIGURA 5.40: EVENTO DO DIA 12-01-2007, PARA DISCRETIZAÇÃO SIMPLIFICADA (1 SUB-BACIA), USANDO DADOS DE PRECIPITAÇÃO OBTIDOS POR RADAR METEOROLÓGICO. ....	106
FIGURA A.1: ESQUEMATIZAÇÃO DAS SUB-BACIAS. FONTE: (HUBER E DICKINSON, 1992). ....	122
FIGURA A.2: REPRESENTAÇÃO DO RESERVATÓRIO NÃO-LINEAR DA SUB-BACIA. FONTE: (HUBER E DICKINSON, 1992). ....	123
FIGURA A.3: ESQUEMA COMPUTACIONAL APROXIMADO DO MÉTODO DE EULER MODIFICADO PARA A VAZÃO. FONTE: (HUBER E DICKINSON, 1992). ....	129

## LISTA DE TABELAS

Página

TABELA 4.1: DIVISÃO FÍSICO TERRITORIAL DE PLANEJAMENTO DA BACIA HIDROGRÁFICA EM ESTUDO, RALPH STETTINGER: MACROZONA / ÁREA DE PLANEJAMENTO/ UTB'S/ZONA. FONTE: (SEPLAMA, 2007). .....	50
TABELA 4.2: ÁREAS DAS UTB'S DA BACIA HIDROGRÁFICA EM ESTUDO, RALPH STETTINGER. FONTE: (VICENTINI, 2000). .....	50
TABELA 4.3: POSTOS PLUVIOGRÁFICOS UTILIZADOS PARA O CÁLCULO DA CHUVA MÉDIA NA BACIA EM ESTUDO, RALPH STETTINGER. ....	53
TABELA 5.1: CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DA BACIA HIDROGRÁFICA EM ESTUDO, RALPH STETTINGER. (VICENTINI, 2000). .....	65
TABELA 5.2: COMPARAÇÃO DO TOTAL MÉDIO ACUMULADO DE PRECIPITAÇÃO MEDIDO PELOS PLUVIÓGRAFOS E ESTIMADO PELO RADAR METEOROLÓGICO. ....	67
TABELA 5.3: RESULTADO DOS COEFICIENTES ( $G = P/R$ ) OBTIDOS DOS NOVE EVENTOS SELECIONADOS. ....	73
TABELA 5.4: COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO LINEAR ( $R$ ) ENTRE OS DADOS DE PRECIPITAÇÃO ESTIMADOS POR RADAR METEOROLÓGICO E MEDIDOS PELOS PLUVIÓGRAFOS DOS NOVE EVENTOS SELECIONADOS. ....	74
TABELA 5.5: DESVIO PADRÃO ENCONTRADO NA COMPARAÇÃO DOS DADOS DE PRECIPITAÇÃO ESTIMADOS POR RADAR METEOROLÓGICO E MEDIDOS PELOS PLUVIÓGRAFOS DOS NOVE EVENTOS SELECIONADOS. ....	74
TABELA 5.6: MEDIÇÕES EFETUADAS COM MOLINETE NO POSTO FLUVIOMÉTRICO DA PRAÇA RALPH STETTINGER. FONTE: (VICENTINI, 2000). ....	75
TABELA 5.7: MEDIÇÕES EFETUADAS COM FLUTUADOR NO POSTO FLUVIOMÉTRICO DA PRAÇA RALPH STETTINGER. FONTE: (VICENTINI, 2000). ....	76
TABELA 5.8: CARACTERÍSTICAS DAS SUB-BACIAS UTILIZADAS NA SIMULAÇÃO COM DISCRETIZAÇÃO DETALHADA. ....	78
TABELA 5.9: CARACTERÍSTICAS DA SUB-BACIA UTILIZADA NA SIMULAÇÃO COM DISCRETIZAÇÃO SIMPLES. ....	78
TABELA 5.10: CARACTERÍSTICAS DO CANAL PARA A DISCRETIZAÇÃO DETALHADA (6 SUB-BACIAS), DA BACIA EM ESTUDO. ....	81
TABELA 5.11: CARACTERÍSTICAS DO CANAL PARA A DISCRETIZAÇÃO SIMPLIFICADA (1 SUB-BACIA), DA BACIA EM ESTUDO. ....	82
TABELA 5.12: PARÂMETROS OBTIDOS NA CALIBRAÇÃO DO MODELO PARA BACIA COM DISCRETIZAÇÃO DETALHADA (6 SUB-BACIAS), UTILIZANDO DADOS DE PRECIPITAÇÃO OBTIDOS POR PLUVIÓGRAFOS. ....	83
TABELA 5.13: PARÂMETROS OBTIDOS NA CALIBRAÇÃO DO MODELO PARA BACIA COM DISCRETIZAÇÃO SIMPLIFICADA (1 SUB-BACIA), UTILIZANDO DADOS DE PRECIPITAÇÃO OBTIDOS POR PLUVIÓGRAFOS. ....	83
TABELA 5.14: RESULTADOS OBTIDOS NA SIMULAÇÃO DOS EVENTOS, USANDO DADOS DE PLUVIÓGRAFOS, PARA A BACIA COM DISCRETIZAÇÃO DETALHADA (6 SUB-BACIAS). ....	83
TABELA 5.15: RESULTADOS OBTIDOS NA SIMULAÇÃO DOS EVENTOS, USANDO DADOS DE PLUVIÓGRAFOS, PARA A BACIA COM DISCRETIZAÇÃO SIMPLIFICADA (1 BACIA). ....	84
TABELA 5.16: PARÂMETROS UTILIZADOS NA VALIDAÇÃO DO MODELO PARA BACIA COM DISCRETIZAÇÃO DETALHADA (6 SUB-BACIAS) E PARA A BACIA COM DISCRETIZAÇÃO SIMPLIFICADA (1 SUB-BACIA). ....	84
TABELA 5.17: PARÂMETROS OBTIDOS NA CALIBRAÇÃO DO MODELO PARA BACIA COM DISCRETIZAÇÃO DETALHADA (6 SUB-BACIAS). ....	96
TABELA 5.18: PARÂMETROS OBTIDOS NA CALIBRAÇÃO DO MODELO PARA BACIA COM DISCRETIZAÇÃO SIMPLIFICADA (1 SUB-BACIA). ....	96

TABELA 5.19: RESULTADOS OBTIDOS NA SIMULAÇÃO DOS EVENTOS, USANDO DADOS DE PLUVIÓGRAFOS, PARA A BACIA COM DISCRETIZAÇÃO DETALHADA (6 SUB-BACIAS). .....	101
TABELA 5.20: RESULTADOS OBTIDOS NA SIMULAÇÃO DOS EVENTOS, USANDO DADOS DE PLUVIÓGRAFOS, PARA A BACIA COM DISCRETIZAÇÃO SIMPLIFICADA (1 SUB-BACIA). .....	101
TABELA 5.21: RESULTADOS OBTIDOS NA SIMULAÇÃO DOS EVENTOS, USANDO DADOS DE RADAR, PARA A BACIA COM DISCRETIZAÇÃO DETALHADA (6 SUB-BACIAS). .....	106
TABELA 5.22: RESULTADOS OBTIDOS NA SIMULAÇÃO DOS EVENTOS, USANDO DADOS DE RADAR, PARA A BACIA COM DISCRETIZAÇÃO SIMPLIFICADA (1SUB-BACIA). .....	106
TABELA A.1: CLASSIFICAÇÃO SUPERFICIAL DA SUB-BACIA. FONTE: (HUBER E DICKINSON, 1992). .....	122
TABELA C.1: EVENTO DO DIA 20/05/2005, OBTIDO POR MEDIDAS DE PLUVIÓGRAFOS.....	141
TABELA C.2: EVENTO DO DIA 24/01/2006 OBTIDO POR MEDIDAS DE PLUVIÓGRAFOS.....	142
TABELA C.3: EVENTO DO DIA 28/01/2006, OBTIDO POR MEDIDAS DE PLUVIÓGRAFOS.....	142
TABELA C.4: EVENTO DO DIA 21/02/2006, OBTIDO POR MEDIDAS DE PLUVIÓGRAFOS.....	142
TABELA C.5: EVENTO DO DIA 04/03/2006, OBTIDO POR MEDIDAS DE PLUVIÓGRAFOS.....	143
TABELA C.6: EVENTO DO DIA 01/11/2006, OBTIDO POR MEDIDAS DE PLUVIÓGRAFOS.....	144
TABELA C.7: EVENTO DO DIA 26/12/2006, OBTIDO POR MEDIDAS DE PLUVIÓGRAFOS.....	145
TABELA C.8: EVENTO DO DIA 27/12/2006, OBTIDO POR MEDIDAS DE PLUVIÓGRAFOS.....	145
TABELA C.9: EVENTO DO DIA 12/01/2007, OBTIDO POR MEDIDAS DE PLUVIÓGRAFOS.....	146
TABELA D.1: EVENTO DO DIA 20/05/2005, OBTIDO POR ESTIMATIVAS DO RADAR METEOROLÓGICO. ....	147
TABELA D.2: EVENTO DO DIA 28/01/2006, OBTIDO POR ESTIMATIVAS DO RADAR METEOROLÓGICO. ....	148
TABELA D.3: EVENTO DO DIA 21/02/2006, OBTIDO POR ESTIMATIVAS DO RADAR METEOROLÓGICO. ....	148
TABELA D.4: EVENTO DO DIA 04/03/2006, OBTIDO POR ESTIMATIVAS DO RADAR METEOROLÓGICO. ....	149
TABELA D.5: EVENTO DO DIA 01/11/2006, OBTIDO POR ESTIMATIVAS DO RADAR METEOROLÓGICO. ....	150
TABELA D.6: EVENTO DO DIA 26/12/2006, OBTIDO POR ESTIMATIVAS DO RADAR METEOROLÓGICO. ....	150
TABELA D.7: EVENTO DO DIA 27/12/2006, OBTIDO POR ESTIMATIVAS DO RADAR METEOROLÓGICO. ....	151
TABELA D.8: EVENTO DO DIA 12/01/2007, OBTIDO POR ESTIMATIVAS DO RADAR METEOROLÓGICO. ....	151

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

### *Abreviações e siglas*

ANA	Agência Nacional de Águas
ANSWERS	Areal Non-point Source Watershed Environment Response Simulation
CAPPI	Constant Altitude Plan Position Indicator
CEEIBH	Comitê Especial de Estudos Integrados de Bacias Hidrográficas
CREAMS	Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems
DHI	Danish Hydraulic Institute
EPA	Environmental Protection Agency
GIS	Geographic Information System
HEC	Hydrologic Engineering Center
IAHS	International Association of Hydrology Sciences
IDHM	The Institute of Hydrology Distributed
IPH	Instituto de Pesquisas Hidráulicas
MODHAC	Modelo Hidrológico Auto-Calibrável
NASA	National Aeronautics and Space Administration
PPI	Plan Position Indicator
SANASA	Sociedade de Abastecimento de Água e Saneamento S.A.
SHE	Système Hydrologique Européen
SIG	Sistema de Informações Geográficas
SMAP	Soil Moisture Accounting Procedure
SSARR	Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation
SWAT	Soil & Water Assessment Tool
SWM	Stanford Watershed Model
SWMM	Storm Water Management Model
SWRRB	Simulator of Water Resources in Rural Basins
TOPMODEL	Topography Based Hydrology Model
TOPOG	TOPOgraphy model
UTB's	Unidades Territoriais Básicas
UGRH	Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos

.....

## ***Símbolos***

A	Área
AI	Parâmetro de porcentagens de área impermeável
As	Área da superfície líquida do nó
C'	Constante adimensional
C#	Número de Courant
D	Profundidade máxima do canal
$\Delta H_{\text{máx}}$	Nível máximo da superfície d'água no passo de tempo
$d_i$	Altura de armazenamento em áreas impermeáveis
$d_p$	Altura de armazenamento em áreas permeáveis
$\Delta t$	Passo de tempo (intervalo de tempo)
E	Eficiência de Nash e Sutcliffe
g	Aceleração gravitacional
ha	Hectare
I	Capacidade de infiltração no solo
$I_0$	Infiltração máxima ou inicial
$I_b$	Infiltração mínima ou final
k	Coefficiente de decaimento da equação de Horton
$k_c$	Coefficiente de compacidade
L	Comprimento do canal ou conduto
n	Coefficiente de rugosidade de Manning
$n_i$	Coefficiente de rugosidade de Manning áreas impermeáveis
$n_p$	Coefficiente de rugosidade de Manning áreas permeáveis
Q	Vazão ou descarga
$Q_p$	Vazão de pico
$Q_{\text{pcal}}$	Vazão de pico calculada
$Q_{\text{pobs}}$	Vazão de pico observada
R	Coefficiente de correlação
$R^2$	Coefficiente de determinação
$R_h$	Raio hidráulico
S	Declividade equivalente do conduto
$S_0$	Desvio padrão dos dados observados
$S_c$	Desvio padrão dos dados calculados
$S_f$	Declividade da linha de energia
t	Tempo
v	Velocidade
V	Volume
V(t)	Velocidade no conduto
$V_{\text{esc}}$	Volume escoado
$V_{\text{esc cal}}$	Volume escoado calculado
$V_{\text{esc obs}}$	Volume escoado observado
W	Largura da sub-bacia
Z	Refletividade do radar

# SUMÁRIO

	Página
<b>RESUMO</b> .....	<b>VII</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>IX</b>
<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>XI</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>XIII</b>
<b>LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS</b> .....	<b>XV</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	<b>5</b>
2.1 OBJETIVO GERAL .....	5
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	5
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>7</b>
3.1 INTRODUÇÃO .....	7
3.2 EFEITOS DA URBANIZAÇÃO NAS CHEIAS .....	9
3.2.1 <i>Efeitos do uso e ocupação das terras sobre os cursos d'água</i> .....	9
3.2.2 <i>Efeitos do crescimento urbano no regime de precipitação</i> .....	11
3.3 DISTRIBUIÇÃO DA CHUVA .....	12
3.3.1 <i>Distribuição espacial da precipitação</i> .....	12
3.3.2 <i>Distribuição temporal da precipitação</i> .....	13
3.4 ESTIMATIVA DE PRECIPITAÇÃO POR SENSORIAMENTO REMOTO .....	14
3.4.1 <i>Monitoramento de chuvas por satélites e radares</i> .....	14
3.4.2 <i>Princípios do radar meteorológico</i> .....	16
3.4.3 <i>Eficiência do radar meteorológico para estimativas de precipitação</i> .....	20
3.5 MODELOS HIDROLÓGICOS.....	23
3.5.1 <i>Definição dos modelos hidrológicos</i> .....	23
3.5.2 <i>Classificação dos modelos hidrológicos</i> .....	26
3.5.3 <i>Modelos hidrológicos distribuídos</i> .....	27
3.5.4 <i>Uso de modelos hidrológicos distribuídos no planejamento urbano</i> .....	28
3.5.5 <i>Calibração dos modelos hidrológicos e análise de sensibilidade</i> .....	29
3.6 MODELOS HIDROLÓGICOS APLICADOS EM BACIAS URBANAS .....	31
3.6.1 <i>O Modelo HEC-HMS</i> .....	32
3.6.2 <i>O Modelo IPH II</i> .....	34
3.6.3 <i>O Modelo SWMM</i> .....	36
<b>4 MATERIAL E MÉTODO</b> .....	<b>45</b>
4.1 MATERIAIS .....	45
4.1.1 <i>Características gerais da área de estudo</i> .....	45
4.1.1.1 <i>Localização</i> .....	45
4.1.1.2 <i>Geologia</i> .....	46
4.1.1.3 <i>Clima e Geomorfologia</i> .....	46

4.1.1.4	Uso e ocupação do solo.....	47
4.1.2	<i>Características físicas da bacia hidrográfica Ralph Stettinger</i> .....	47
4.1.3	<i>Estações de Monitoramento</i> .....	51
4.1.3.1	Monitoramento pluviográfico e fluviográfico.....	51
4.1.3.2	Radar Meteorológico de São Paulo.....	54
4.1.3.3	Características técnicas e aplicação do radar meteorológico de São Paulo.....	54
4.2	MÉTODOS.....	56
4.2.1	<i>Análise do campo de precipitação</i> .....	56
4.2.2	<i>Análise do sistema de drenagem da bacia</i> .....	57
4.2.2.1	Discretização das sub-bacias.....	57
4.2.3	<i>Aplicação do modelo SWMM</i> .....	58
4.2.3.1	Representação do sistema de drenagem no modelo SWMM.....	59
4.2.3.2	Estabilidade do modelo.....	60
4.2.4	<i>Calibração do modelo SWMM</i> .....	61
4.2.5	<i>Análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo SWMM</i> .....	63
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>65</b>
5.1	CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DA BACIA EM ESTUDO.....	65
5.2	DADOS DE PRECIPITAÇÃO.....	66
5.2.1	<i>Seleção dos dados de precipitação e hietograma médio da bacia Ralph Stettinger</i> .....	66
5.2.2	<i>Análise dos dados de precipitação</i> .....	67
5.3	MONITORAMENTO HIDROLÓGICO.....	75
5.3.1	<i>Determinação da curva chave para o posto fluviométrico</i> .....	75
5.4	DISCRETIZAÇÃO DA BACIA E ANÁLISE DO SISTEMA DE DRENAGEM.....	78
5.4.1	<i>Discretização das sub-bacias</i> .....	78
5.5	CALIBRAÇÃO E ANÁLISE DOS PARÂMETROS DO MODELO SWMM.....	82
5.5.1	<i>Calibração do modelo</i> .....	82
5.5.2	<i>Análise dos parâmetros obtidos nas calibrações</i> .....	90
5.6	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE.....	93
5.6.1	<i>Sensibilidade do módulo Runoff</i> .....	93
5.6.2	<i>Sensibilidade do módulo Extran</i> .....	95
5.7	VALIDAÇÃO DO MODELO SWMM.....	96
5.7.1	<i>Usando dados precipitação medidos por pluviógrafos</i> .....	96
5.7.2	<i>Usando dados de precipitação estimados pelo radar meteorológico</i> .....	102
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>109</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>113</b>
<b>A</b>	<b>ANEXO A.....</b>	<b>121</b>
A.1	BLOCO RUNOFF.....	121
A.2	INFILTRAÇÃO.....	125
A.3	BLOCO EXTRAN.....	125
<b>B</b>	<b>ANEXO B - CONVERSÃO DOS DADOS DE RADAR.....</b>	<b>137</b>
<b>C</b>	<b>ANEXO C – EVENTOS MEDIDOS POR PLUVIÓGRAFOS.....</b>	<b>141</b>
<b>D</b>	<b>ANEXO D – EVENTOS ESTIMADOS PELO RADAR.....</b>	<b>147</b>

# 1 INTRODUÇÃO

---

A população urbana no Brasil é da ordem de 80% da população total. Sua ocupação tem sido realizada de forma pouco planejada, com grandes conflitos institucionais e tecnológicos. Um dos principais problemas relacionados com a ocupação urbana são as inundações e os impactos ambientais. O desenvolvimento urbano tem produzido um aumento na frequência das inundações, na produção de sedimentos e na deterioração da qualidade da água, pois, à medida que a cidade se urbaniza, ocorre o aumento das vazões máximas em decorrência da impermeabilização e da canalização. A tendência atual do limitado planejamento urbano integrado está levando a cidade a uma degradação ambiental urbana com custo extremamente alto para a sociedade.

O desenvolvimento sócio-econômico ocorrido nas últimas décadas tem levado a transformações globais, as quais produziram mudanças importantes no ambiente. Em bacias de qualquer parte do mundo, as atividades humanas interferem gradualmente no regime hidrológico e ecológico natural, ameaçando os recursos hídricos e os ambientes aquáticos. Os suplementos de água não estão protegidos para milhões de pessoas no mundo, riscos de enchentes têm aumentado e a biodiversidade é drasticamente diminuída em resultado da contínua destruição dos sistemas ripários. Estes impactos não são sentidos apenas no seu local de origem, mas são transmitidos por meio das interações da superfície do solo para distúrbios climáticos, contribuindo para o aumento da severidade das enchentes e estiagem (SIVAPALAN *et al.*, 2003).

Um dos desafios do século XXI é identificar as respostas apropriadas para estas ameaças. Políticas de gerenciamento sustentável são necessárias para proverem água não somente para a manutenção da vida, saúde e desenvolvimento, mas também para proteger os ecossistemas já degradados e para tentar reduzir a severidade, frequência e impactos ambientais mais perigosos. Assim, o gestor do meio ambiente e da água requer uma variedade de ferramentas que possam prover as respostas para as novas situações, além de escalas de tempo/espço e climas,

para dar suporte ao gerenciamento sustentável das bacias hidrográficas, com a integração econômica, a social e as perspectivas ambientais (SIVAPALAN *et al.*, 2003).

O conhecimento real da distribuição da precipitação é fundamental onde se faz necessário para controle de bacias urbanas sujeitas a enchentes. Este controle fica prejudicado em suas extensões espaciais e temporais pelas limitações de redes pluviométricas convencionais. É sob esse aspecto que o radar meteorológico desempenha importante papel funcionando como um telepluviômetro eletrônico em tempo real, cobrindo super ou subestimativa do total de chuva ou sua variabilidade espacial, usada como insumo, por exemplo, em modelos hidrológicos de estimativa de pico de vazão de um canal (ANTONIO, 1996).

A intensidade da precipitação exibe enorme flutuação em espaço e tempo. As medidas pontuais por pluviômetro e as observações por sensoriamento remoto de radar e satélite revelam que os campos de chuva são altamente variáveis numa escala espacial de alguns metros a centenas de quilômetros. Além disso, a determinação da distribuição da chuva contém as incertezas decorrentes dos métodos utilizados para quantificar essa distribuição. Frequentemente, a determinação da distribuição da quantidade de chuva por pluviômetros, é feita com base no princípio de média (TROVATI *et al.*, 2007).

A baixa densidade de postos pluviométricos em bacias brasileiras tem sido o fator determinante nas incertezas dos resultados de diversos modelos hidrológicos que têm sido aplicados no país. Assim sendo, a busca para o melhor entendimento da variabilidade no espaço e no tempo e o modo de como quantificar essa variabilidade tem conduzido os pesquisadores a uma considerável atividade para a representação do campo espacial e temporal da chuva. (TROVATI *et al.*, 2007). Nesse contexto, o estudo de estimativas espaciais de precipitação podem ser extremamente úteis na busca de hidrogramas de projeto mais confiáveis. Essas estimativas, embora a precariedade dos dados observados, devem fornecer uma boa noção da distribuição espacial das chuvas.

Assim, com este trabalho, utilizam-se estimativas da distribuição espacial da precipitação, obtidas a partir de dados de radar meteorológico, que são comparados aos dados da rede pluviométrica. Os dados da distribuição espacial da precipitação são usados como dados de entrada do modelo hidrológico distribuído *Storm Water Management Model* (SWMM), o qual foi aplicado a uma pequena bacia urbana da cidade de Campinas – SP, com área de drenagem de

7,59 km<sup>2</sup>. Os resultados são analisados comparando os hidrogramas simulados com os observados.

O trabalho está focado na avaliação das vazões máximas de uma bacia urbana, utilizando um modelo hidrológico chuva-vazão, mediante dados de precipitação obtidos por radar e por pluviógrafos. Desta forma, é formulada uma metodologia para aquisição dos parâmetros fisiográficos de uma bacia hidrográfica urbana, utilizados no modelo hidrológico chuva-vazão SWMM, com a subsequente aplicação em um estudo de caso na bacia Ralph Stettinger, sub-bacia do Ribeirão das Anhumas, região central, município de Campinas, estado de São Paulo, Brasil. Esta bacia hidrográfica foi escolhida por ser uma bacia típica representativa da área central de Campinas, em escala de relevo, vegetação, processo de urbanização e hidrografia. Possui boa rede pluviográfica para aferir as estimativas da distribuição espacial e temporal da chuva e com dados fluviométricos de várias enchentes ocorridas na bacia. Os dados de radar utilizados foram os do radar meteorológico de São Paulo localizado na cidade de São Paulo.

Para avaliar o grau de discretização necessário para uma boa representação do sistema de drenagem na bacia estudada e identificar o ganho de qualidade na representação dos eventos observados na aplicação do modelo hidrológico SWMM foram consideradas duas alternativas : a bacia concentrada (toda a bacia) e subdividida em seis sub-bacias.

O presente trabalho tem como conteúdo os seguintes capítulos:

- i. capítulo 2 – Objetivos: contém o objetivo geral e objetivos específicos.
- ii. capítulo 3 – Revisão bibliográfica: são apresentados conceitos sobre efeitos da urbanização; modelos hidrológicos e suas aplicações; a estrutura geral do modelo chuva-vazão SWMM, sua aplicação em bacias urbanas, e sensoriamento remoto.
- iii. capítulo 4 – Materiais e Métodos: descrição da metodologia para aquisição e calibração dos parâmetros fisiográficos para aplicação do modelo chuva-vazão SWMM à bacia urbana e para análise dos resultados.
- iv. capítulo 5 – Resultados e Discussão: o estudo de caso para a bacia Ralph Stettinger, no centro do município de Campinas- SP, como forma de aplicação da técnica desenvolvida no capítulo 4 e discussão dos resultados obtidos.
- v. capítulo 6 – Conclusão e Recomendação: considerando a metodologia utilizada e a bacia estudada é apresentada a conclusão do trabalho e as sugestões para trabalhos futuros.



## **2 OBJETIVOS**

---

### **2.1 OBJETIVO GERAL**

O objetivo principal deste trabalho é fazer uma avaliação comparativa das medidas de chuva e de sua distribuição espacial e temporal obtidas pelo radar com os obtidos por pluviógrafo e utilizar estimativas de precipitação obtidas a partir de radar para avaliar as vazões de enchentes em bacias urbanas. Serão estudados os hidrogramas de enchente na bacia hidrográfica urbana Ralph Stettinger, uma sub-bacia do Ribeirão das Anhumas, na cidade de Campinas- SP, por meio do modelo hidrológico SWMM.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Avaliação comparativa dos dados de chuva e de sua distribuição espacial e temporal obtidos pelo radar com os obtidos por pluviógrafo;
- Obter e discutir os parâmetros de entrada e o modelo chuva-vazão SWMM para a bacia hidrográfica urbana Ralph Stettinger;
- Avaliar o grau de refinamento de discretização necessário para uma boa representação do sistema de drenagem na bacia estudada;
- Avaliação dos efeitos da representação da chuva nos hidrogramas de enchente.



## **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

---

### **3.1 INTRODUÇÃO**

A deterioração dos recursos naturais, principalmente solo e água, vem crescendo intensamente, atingindo níveis críticos, observada pelo assoreamento e poluição dos cursos e espelhos d'água. Em função disso, observam-se grande prejuízo à saúde dos seres vivos, destruição de estradas, de pontes e bueiros, riscos na geração de energia, escassez de água para irrigação e abastecimento, redução da produtividade agrícola e diminuição da renda líquida (BRASIL, 1987). Com a deterioração dos recursos naturais, criou-se uma preocupação maior com a quantificação do impacto que a exploração humana pode provocar na bacia, buscando medidas preventivas que minimizem esses danos.

A análise de características, como cobertura vegetal, topografia, drenagem e tipo de solo, permite chegar ao uso racional e adequado de um determinado espaço geográfico. Dessa maneira, determinam-se áreas de preservação de mananciais, reservas florestais, áreas agrícolas, distritos industriais e áreas de expansão urbana, para que o uso do solo obedeça às características naturais da bacia, e o planejamento considere o desenvolvimento sustentado (TUCCI, 2001).

A relação íntima existente entre a cobertura vegetal e a água, especialmente nas cabeceiras dos rios onde estão suas nascentes, vem sendo constantemente alterada pelo homem através da expansão desordenada dos processos de urbanização, industrialização e da agricultura, entre vários outros processos de transformação antrópica da paisagem, que alteram os ciclos biogeoquímicos e o ciclo hidrológico. Assim, considerando as projeções de crescimento da população mundial, não há dúvida de que os impactos ambientais destas transformações começam a ameaçar a sustentabilidade dos recursos hídricos e, conseqüentemente, a qualidade de vida para a sociedade como um todo (LIMA, 2000).

Tendo em vista os problemas apresentados, Correia (2003) propõe que seja alterada, o mais breve, a política de utilização dos recursos. A comunidade técnica e científica deve fornecer um suporte de conhecimentos, promovendo uma utilização harmônica e sustentável dos recursos, através do conhecimento das disponibilidades hídricas no espaço e tempo de uma bacia hidrográfica. Os modelos de simulação hidrológica são utilizados para a compreensão, para investigação dos impactos causados pelas modificações no ambiente ao regime hidrológico.

A simulação hidrológica tem como princípio desenvolver modelos que representem os processos e os mecanismos hidrológicos em uma bacia. Um importante modelo usado na simulação hidrológica é o modelo que simula a transformação de chuva em vazão. Eles são utilizados para simular processos hidrológicos, principalmente, no que se refere à dinâmica dos escoamentos na seção do exutório da bacia. Esses modelos permitem simular cenários futuros de uso e ocupação das bacias, o que auxilia os tomadores de decisão em suas ações no planejamento do desenvolvimento do território (FERREIRA, 2004).

Maiores dificuldades são encontradas quando se aplicam ferramentas tradicionais de previsões ou modelos para bacias com pouco ou nenhum dado hidrológico observado. Em vista da enorme heterogeneidade espaço-temporal do clima e das características da superfície do solo, a extrapolação de informações, de conhecimento e de entendimento, a partir de bacias que possuem dados para bacias sem dados, são seguidas de consideráveis dificuldades e incertezas. Devido à não linearidade das respostas da bacia, causadas pela flutuação multianual e multidecadal nos dados climáticos de entrada e mudanças induzidas pelo homem no clima e uso do solo, tentativas de aproximação baseadas puramente em dados passados são inadequadas para realização de previsões futuras (SIVAPALAN *et al.*, 2003).

Assim, uma grande variedade de modelos distribuídos no espaço tem sido desenvolvida para simulação dos processos hidrológicos que ocorrem em bacias hidrográficas. Os modelos hidrológicos distribuídos procuram representar a variação espacial dos processos hidrológicos, além da variabilidade temporal.

## **3.2 EFEITOS DA URBANIZAÇÃO NAS CHEIAS**

### **3.2.1 Efeitos do uso e ocupação das terras sobre os cursos d'água**

Em geral, o atendimento à enchente somente é realizado depois de sua ocorrência. A tendência é que o problema fique no esquecimento após cada enchente, retornando no dia seguinte de uma nova enchente. Isto se deve a vários fatores, entre os quais: (a) falta de conhecimento sobre controle de enchentes dos planejadores urbanos; (b) desorganização em âmbito federal e estadual das atividades de controle de enchentes; (c) pouca informação técnica sobre o assunto em relação à graduação na engenharia; (d) desgaste político para o administrador público resultante do controle não-estrutural (zoneamento), já que a população está sempre esperando uma nova obra; além disso, quando ocorre a enchente, a Prefeitura decreta calamidade pública e recebe recursos a fundo perdido sem que haja necessidade de efetuar concorrência pública para gastar os recursos. Esse processo não incentiva a prevenção do controle através do zoneamento de enchentes e outras medidas não-estruturais; (e) falta de educação da população sobre o assunto (VILLANUEVA e TUCCI, 2001).

As enchentes ampliadas pela urbanização, em geral, ocorrem em bacias pequenas. Evidentemente que as exceções são as grandes regiões metropolitanas, como São Paulo, onde o problema abrange cerca de 800 km<sup>2</sup>. Nas grandes bacias existe o efeito dos vários canais de macrodrenagem que são influenciados pela distribuição temporal e espacial das precipitações máximas.

A tendência da urbanização é de ocorrer de jusante para montante na macrodrenagem urbana devido às características de relevo. Quando um loteamento é projetado, os municípios exigem apenas que o projeto de esgotos pluviais seja eficiente no sentido de drenar a água do loteamento. Quando o poder público não controla essa urbanização ou não amplia a capacidade da macrodrenagem, aumenta a ocorrência das enchentes, com perdas sociais e econômicas para a sociedade. Normalmente, o impacto do aumento da vazão máxima sobre o restante da bacia não é avaliado pelo projetista ou exigido pelo município. A combinação do impacto dos diferentes loteamentos produz aumento da ocorrência de enchentes para jusante. Esse processo ocorre mediante a sobrecarga da drenagem secundária (condutos) sobre a macrodrenagem (riachos e canais) que atravessam as cidades. As áreas mais afetadas, por causa da construção de novas habitações a montante, são as mais antigas localizadas a jusante.

As consequências dessa falta de planejamento e regulamentação são sentidas em praticamente todas as cidades de médio e grande porte do País. Depois que o espaço estiver todo ocupado, as soluções disponíveis serão extremamente caras, tais como canalizações, diques com bombeamento, reversões, barragens, entre outros.

O controle das cheias urbanas decorrentes da urbanização é realizado, na maioria das vezes, por meio da canalização dos trechos críticos. Esse tipo de solução segue a visão particular de um trecho da bacia, sem que as consequências sejam previstas para o restante da mesma ou dentro de diferentes horizontes de ocupação urbana. A canalização dos pontos críticos acaba apenas transferindo a inundação de um lugar para outro na bacia. Quando a canalização está no seu estágio final, já não existem espaços laterais para ampliar a seção e as soluções convergem para o aprofundamento do canal, com custos extremamente altos (dependendo do subsolo, largura, revestimento, etc).

Dentre os diversos impactos resultantes das atividades humanas que interferem no ciclo da água, os principais referem-se à eliminação da cobertura vegetal e ao aumento das superfícies impermeáveis que fazem com que cresça a frequência de inundações e mudanças nas características dos rios em função do aumento do escoamento superficial.

A cobertura vegetal representa um dos constituintes ambientais de maior fragilidade quando se consideram as possíveis intervenções na bacia. As intervenções na cobertura vegetal podem produzir modificações importantes no solo, na paisagem, na fauna e, em especial, na água.

As condições de degradação são mais intensas quando ocorre a substituição da cobertura florestal pela agricultura com baixo grau tecnológico, acelerando a degradação dos solos, águas superficiais e subterrâneas. Alterações nas características físicas, químicas e biológicas do solo (como porosidade do solo, teor de matéria orgânica, capacidade de infiltração, retenção e redistribuição de água no perfil) interferem na produção de água. Além de aumentar a quantidade de água interceptada, a vegetação amortecce a energia do impacto das gotas de chuva reduzindo a desagregação dos agregados, a obstrução dos poros e o selamento superficial do solo. A presença de cobertura vegetal na superfície do solo também promove a redução da velocidade do escoamento superficial devido ao aumento da rugosidade hidráulica do percurso ao longo do qual ocorre o escoamento (SILVA *et al.*, 2001). Segundo Silva *et al.* (2001) verificaram que os valores de vazão máxima de escoamento superficial aumentam com o incremento da intensidade de precipitação e com a diminuição na porcentagem de cobertura do solo.

A degradação dos recursos hídricos é um processo complexo, porque se relaciona diretamente com as condições ambientais e a utilização não sustentável dos recursos naturais. Para o gerenciamento dos recursos hídricos é necessário que seja feita a avaliação dos impactos nas alterações no uso e ocupação do solo antes da sua implantação, através de modelos de simulação hidrológica, procurando minimizar os impactos no ambiente como um todo.

### **3.2.2 Efeitos do crescimento urbano no regime de precipitação**

A maior parte da população brasileira mora em cidades, que continuam a apresentar crescimento alarmante. É bem conhecido que a urbanização modifica o clima por causa do efeito “ilha de calor” que faz com que as temperaturas máximas e mínimas anuais frequentemente mostram tendências positivas com o crescimento da área urbanizada. Mas além das mudanças nas temperaturas extremas, também existe a possibilidade de modificações no regime de precipitação: o calor armazenado em prédios e ruas urbanas poderia causar convecção mais intensa e precipitação mais intensa e/ou mais frequente, e a ocorrência de vendavais e granizo. As mudanças no regime de precipitação também podem ocorrer em função do impacto dos aerossóis e gases associados à poluição. Parte dos aerossóis de origem antropogênica exercem o importante papel de núcleos de condensação de nuvens. Outra parcela dos aerossóis tem eficiente papel como núcleo de congelamento da água em nuvens. Os estudos sobre o impacto dos aerossóis na física da precipitação indicam que o excesso de núcleos de condensação pode levar à formação de gotas de nuvens muito pequenas e diminuição de chuvas, sobretudo as precipitações mais leves. De fato, este efeito foi observado em São Paulo, onde a frequência de chuvas leves diminuiu de forma estatisticamente significativa (XAVIER *et al.* 1992 e 1994). Por outro lado, a presença de mais núcleos de congelamento, pode levar à formação de nuvens mais profundas e, portanto as chuvas intensas podem aumentar. Também foi observado em São Paulo um aumento das chuvas mais intensas, sobretudo no período de verão. E as chuvas intensas em áreas urbanas são uma das causas principais dos deslizamentos que causam mortes e danificações à infraestrutura urbana.

Nos moldes de hoje, já vimos que a urbanização provoca desequilíbrio do ciclo hidrológico e isto pode ser combatido com abordagem adequada da drenagem. Tucci (2002) alerta que o asfalto, em virtude de sua cor, absorve mais energia da radiação solar do que as superfícies naturais e o concreto. À medida que as superfícies de concreto envelhecem tendem a escurecer e a aumentar a absorção de radiação solar. Isto, combinado com uma drenagem que

afasta rapidamente do meio urbano as águas das chuvas, (além disso, fazendo-as circular em condutos enterrados) agrava mais ainda a “ilha de calor” porque tira a oportunidade da água circulante no meio urbano em absorver parte do calor. Ou seja, a urbanização impermeabiliza, uma drenagem urbana equivocada livra rapidamente os excessos pluviais gerados, fazendo com que a água, com seu alto calor específico, não participe do balanço energético, rapidamente penetram com temperaturas mais frias nos corpos d’água receptores.

A drenagem urbana com preceitos ambientais contribui para minimizar esses efeitos porque é favorável à manutenção de córregos naturais e ao armazenamento em bacias de retenção. O incentivo à utilização de superfícies permeáveis, mesmo as não vegetadas, retém mais a água e sua capacidade de absorção de calor por mais tempo no perímetro urbano.

### **3.3 DISTRIBUIÇÃO DA CHUVA**

#### **3.3.1 Distribuição espacial da precipitação**

É de fundamental importância no estudo das tormentas de projeto o conhecimento de sua distribuição espacial. Existem diversas maneiras de se conseguir a distribuição espacial das tormentas na bacia hidrográfica, tais como:

- Através de informações obtidas de uma rede de postos pluviográficos ou pluviométricos;
- Através de informações obtidas de radar meteorológico.

Caso se disponha de uma rede de postos pluviográficos ou pluviométricos, dois métodos são destacados na obtenção da distribuição espacial média, em determinada área: o método das isoietas e o método dos polígonos de Thiessen.

Dessa forma, se a rede de postos é suficientemente densa, o método mais indicado para caracterizar a distribuição espacial da tormenta é o método das isoietas, ou seja, método das linhas de igual precipitação. Este método consiste em plotar em planta as alturas pluviométricas correspondentes a uma dada duração para cada posto pluviométrico. Desta maneira, traçam-se as isoietas das alturas pluviométricas, por interpolação. Planimetrando-se as áreas entre as isoietas obtêm-se os volumes precipitados. Na interpolação devem-se considerar os seguintes fatores: a

topografia da bacia estudada, a distribuição espacial das isoietas médias anuais, sazonais ou mensais e a distância da região ao mar.

Gomes e Massambani (1983) constataram a variabilidade espacial da precipitação estudando os registros de 19 postos pluviométricos, com 11 anos de duração, na bacia do Alto Tietê com 3850 km<sup>2</sup>, que abrange a região urbana do município de São Paulo. Os autores organizaram isoietas representando as precipitações médias anuais e mensais de fevereiro a agosto, respectivamente o mês mais chuvoso e o mais seco. Verificaram a intensa influência da topografia, que evidencia o efeito orográfico e a tendência do aumento da precipitação na região urbanizada. Explicitaram também as diferenças no padrão de distribuição espacial entre precipitações frontais e convectivas ao apresentar as isoietas de dos eventos típicos, o evento frontal apresenta uma distribuição mais homogênea.

O outro método para a determinação espacial da chuva é o método dos polígonos de Thiessen. As alturas pluviométricas de cada posto são multiplicadas pela proporção de sua área geométrica de influência. Esta área é determinada pelas bissetrizes dos segmentos que unem cada dois postos contíguos.

Einfalt *et al.*(1998) estudaram a variação do volume total da precipitação em uma bacia quando os dados de uma única estação pluviográfica são utilizados para obter a precipitação média comparada com uma precipitação espacializada na área obtida através da interpolação de dados de três estações, utilizando o polígono de Thiessen. Eles estudaram uma bacia de 20 km<sup>2</sup> no nordeste da Alemanha com série de dados de 43 anos. Foi realizada uma análise dos eventos extremos para a estação de base e para os dados espacializados. No gráfico de período de retorno versus volume de chuva, os dados espacializados ficaram 30% abaixo comparados a estação de base.

A precipitação pode ser medida também de forma distribuída por sensoriamento remoto. O radar meteorológico é um dos instrumentos que possibilita esse tipo de coleta. Seu princípio de funcionamento é apresentado em detalhes no item 3.4.

### **3.3.2 Distribuição temporal da precipitação**

Assim como a distribuição espacial, a distribuição temporal da chuva tem fundamental importância no estudo da chuva de projeto e conseqüentemente, na determinação do escoamento

superficial direto, ou seja, no volume e pico do hidrograma de projeto, os quais determinam o dimensionamento de obras de drenagem urbana.

Para se determinar a distribuição temporal de uma chuva de projeto para uma bacia hidrográfica, é importante a existência de um dos seguintes requisitos: uma densa rede de postos pluviográficos ou pluviométricos; dados de radar meteorológico ou relações de intensidade-duração-frequência.

Com os dados pluviográficos ou pluviométricos, são construídas as curvas cronológicas de massas dos diversos postos da bacia hidrográfica. Desta forma, pode-se determinar um padrão típico da variação no espaço e no tempo das chuvas das tormentas desta bacia hidrográfica.

Berne *et al.* (2004), forneceram recomendações para a resolução temporal e espacial de medidas de precipitação necessárias para aplicações em hidrologia urbana, baseado em investigações quantitativas de escalas espaço-tempo de bacias urbanas e precipitação. Os autores estudaram a dinâmica temporal da chuva-vazão usando valores de tempo de escoamento derivados séries temporais de chuva-vazão para um conjunto de bacias urbanas. Foi analisada com alta resolução a estrutura temporal e espacial das precipitações utilizando medidas de pluviógrafos e do radar *Hydromet* 98 de três eventos intensos de chuva típicos do Mediterrâneo. A resolução espacial e temporal das chuvas necessária para regiões mediterrânicas foi estimada como uma função da superfície da bacia. De acordo com os resultados, bacias urbanas da ordem de 10 km<sup>2</sup> exigem uma resolução temporal de cerca de 5 minutos e uma resolução espacial de cerca de 3 km. Para bacias urbanas da ordem de 1 km<sup>2</sup>, é necessária uma resolução de cerca de 3 minutos e 2 km, que redes operacionais comuns ou radares não podem fornecer.

## **3.4 ESTIMATIVA DE PRECIPITAÇÃO POR SENSORIAMENTO REMOTO**

### **3.4.1 Monitoramento de chuvas por satélites e radares**

O conhecimento da precipitação é de fundamental importância para o desenvolvimento de áreas que variam desde hidrologia e agricultura a pesquisas de mudanças climáticas. Em função da grande variabilidade espaço/temporal da precipitação, extrapolações e/ou interpolações, para toda área de interesse, de medidas pontuais de precipitação pode incorrer em erros. Pois, admite-se uma estimativa de precipitação para áreas mais distantes dos pontos

medidos, sem qualquer indício físico real sobre a quantidade de precipitação verdadeiramente ocorrida.

Pluviógrafos medem bem a intensidade e duração da chuva, mas não têm representatividade espacial, mesmo para uma rede densa de medição. Com isso, consegue-se continuidade apenas temporal das medições, dada a impossibilidade de se dispor de aparelhos de medição sobre toda a superfície a ser observada.

O emprego rotineiro de técnicas de sensoriamento remoto para estimativas de precipitação ainda é incomum, estando restrito aos países desenvolvidos, notadamente os EUA. Essa ausência, no Brasil, deve-se ao geral desconhecimento das possibilidades do sensoriamento remoto para estimativas de precipitação, a pequena difusão na sociedade das imagens de satélite e radar meteorológico e pela ausência de técnicas adaptadas às diversas condições climatológicas existentes no país.

Diversas metodologias para estimativa de precipitação por meio de imagens de satélite vêm sendo propostas. Estas metodologias se baseiam em imagens feitas por vários satélites, em diversas bandas do espectro eletromagnético. Destacam-se os satélites da série GOES (*Geostationary Operational Environmental System*), satélites americanos mantidos pela NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), que disponibilizam imagens para a América do Sul em intervalos de trinta minutos e o satélite TRMM (*Tropical Rainfall Measuring Mission*) da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) e JAXA (*Japan Aerospace Exploration Agency*), que possui resolução temporal de 3 horas e com o objetivo específico de medição de precipitação nos trópicos. O satélite TRMM tem mais sensores do que os de GOES, porém a sua cobertura espacial e temporal é mais restrita.

O CPTEC (Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos) do INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais) do Brasil disponibiliza rotineiramente, pelo site, (via Internet) estimativas de precipitação diária para toda a América do Sul e decenal apenas para o Brasil. No entanto, ressalta-se que as estimativas disponibilizadas são realizadas pela NOAA, com a técnica NESDIS (*National Environmental Satellite Data Information Service*) calibrada para os Estados Unidos da América e não especificamente para o Brasil ou América do Sul.

De acordo com Braga e Massambani (1997), os programas NEXRAD (*NEXt Generation RADar*) nos Estados Unidos e COST (*European Co-operation in the field of Scientific and Technical research*), na Europa, evidenciaram o grande investimento humano e material que tem

sido feito no estudo de radares. Entretanto, os dados de radar são pouco explorados em hidrologia. Isto ocorre em função da dificuldade de aquisição dos dados de radar, da falta de confiança nestes dados e a falta de integração entre hidrólogos e especialistas em radar.

Contudo, a pequena quantidade e relativa má distribuição de postos pluviométricos e pluviográficos em nosso país é notória. Como a precipitação é a variável determinante da qualidade dos resultados de um modelo hidrológico, o sensoriamento remoto parece ter uma contribuição importante a dar na representação da distribuição temporal de eventos de chuva, surgindo um espaço para pesquisa científica em hidrologia.

### **3.4.2 Princípios do radar meteorológico**

Radar (*RA*dio *D*etectio*n* *A*nd *R*ang*ing*) é um sistema eletromagnético para detecção e localização de objetos. O princípio de operação de um radar é relativamente simples: um transmissor emite um pulso de energia eletromagnética, o qual se propaga a partir de uma antena móvel. Esse sinal viaja com a velocidade da luz e, ao encontrar um objeto, é parcialmente refletido, retornando ao aparelho pela mesma antena, sendo, porém, pela atuação de um comutador automático, encaminhado para um receptor.

As medidas de precipitação com radar baseiam-se na quantidade da energia que retorna ao radar refletida pela chuva, cristais de gelo ou granizo, sobre os quais incidiu a radiação emitida através da antena do equipamento. Os radares transmitem periodicamente um pulso de radiação eletromagnética de micro-onda com duração de poucos microssegundos, um pico de energia de centenas de quilowatts e frequência na faixa de gigahertz. Quando o pulso de energia de micro-onda atinge um alvo, uma parcela da energia incidente é refletida de volta sendo recebida pela antena, onde é detectada e, a seguir, enviada para processamento. O intervalo de tempo decorrido entre a transmissão do pulso e a recepção da radiação retroespalhada pelo alvo determina a distância ao radar, enquanto que a posição da antena determina sua localização em relação à posição do radar. O sinal retornado ao radar é então adequadamente tratado em uma interface e encaminhado a um sistema de processamento. A partir daí, os sinais, já convertidos em informação de precipitação, são registrados e estão disponíveis para serem visualizados em monitores e impressoras ou sofrerem algum tipo de processamento (ANTONIO, 1996).

O radar meteorológico permite a obtenção de medidas provenientes do retorno dos alvos em tempo real com alta resolução espacial. A potência de retorno está relacionada com o espectro de gotas no volume iluminado e é denominado de refletividade. A partir deste espectro, pode-se determinar a taxa de precipitação ( $\text{mm h}^{-1}$ ), o conteúdo de água líquida ( $\text{g m}^{-2}$ ) e fator de refletividade ( $\text{mm}^6 \text{m}^{-3}$ ). Assim, para se estabelecer uma relação entre medidas do radar meteorológico e as medidas de precipitação, é necessário ter conhecimento da distribuição do tamanho das gotas contidas no volume iluminado pelo radar.

A energia do radar refletida pelas partículas de precipitação é representada pelo fator de refletividade do radar ( $Z$ ) que é proporcional à sexta potência dos diâmetros das partículas contidas em um volume iluminado pelo feixe (WILSON e BRANDES, 1979) e representado pela equação (3.1).

$$Z = \int_0^{\infty} N(D) D^6 dD = \sum_i D_i^6 \quad (3.1)$$

Na qual:

$Z$  = refletividade do radar ( $\text{mm}^6 \text{m}^{-3}$ );

$N(D)$  = é o número de gotas com diâmetros entre  $D$  e  $D + dD$  em uma unidade de volume de ar;

$D$  = diâmetro das gotas de chuva.

A intensidade de chuva, também denominada *rainfall rate* ( $R$ ) é obtida a partir do fator de refletividade do radar ( $Z$ ) com a equação (3.2) de Marshall e Palmer (1948) conhecida como relação  $Z$ - $R$ , sendo que Marshall e Palmer (1948) encontraram empiricamente os valores de 200 e 1,6 para os parâmetros  $a$  e  $b$  respectivamente, da equação (3.2), utilizados para chuvas estratiformes e pelo sistema de processamento do radar meteorológico de São Paulo. Esta relação ( $Z$ - $R$ ) tem embutida dentro de si outra relação entre velocidade da gota de chuva, seu diâmetro e também uma distribuição de tamanho de gota (*drop-size distribution*), já que a energia retornada pela chuva depende da distribuição das gotas dentro do volume iluminado pelo feixe do radar (WILSON e BRANDES, 1979).

$$Z = a R^b = 200 R^{1,6} \quad (3.2)$$

Na qual:

$R$  = é a *rainfall rate* ou intensidade de precipitação (mm/h);

$a$  e  $b$  = parâmetros da equação que dependem da origem da precipitação.

$a = 200$

$b = 1,6$

Os valores de refletividade de um radar são relacionados com os valores lidos em um disdrômetro. Disdrômetro é um equipamento desenvolvido para se obter amostras estatisticamente representativas das gotas presentes em uma determinada região. Com esse equipamento é possível determinar o espectro das gotas de chuva. O disdrômetro transforma o momentum mecânico da gota incidente em seu cone sensor em impulso elétrico. A amplitude do pulso elétrico gerado é proporcional ao diâmetro da partícula e sua velocidade de queda, que também depende do diâmetro da gota. Desta forma, a amplitude do pulso é proporcional ao tamanho da gota incidente. O sinal, assim obtido, deve ser processado e analisado por *softwares* específicos que fornecem o espectro da gota. A partir deste espectro é possível calcular tanto a refletividade equivalente do radar, quanto à intensidade de chuva.

Segundo Calvetti *et al.* (2003) radares meteorológicos permitem uma boa amostragem espacial e temporal da estimativa da taxa de precipitação, mas com uma incerteza maior do que a de uma rede de pluviômetros, devido às fontes de erro.

De acordo com Wilson e Brandes (1979) numerosos fatores podem causar erros na medida de chuva pelo radar. Estes fatores podem ser categorizados como: erros na estimativa do fator de refletividade do radar ( $Z$ ); variações na relação  $Z$ - $R$  e diferenças na amostragem entre medidores de superfície e radar. Uma fonte de erro na medida do  $Z$  origina-se da calibração do próprio radar. Frequentemente, mesmo após calibração do sistema eletrônico, presumivelmente cuidadosa, erros sistemáticos na medida da chuva permanecem. Por esta razão, é desejável que a calibração inclua uma fonte independente, isto é, a comparação por medidores de superfície (pluviômetros, pluviógrafos) ou disdrômetros. Outras fontes de erro não associadas com o equipamento são: bloqueio do feixe por obstáculos próximos ao local do radar; propagação anômala do feixe do radar; desenvolvimento de películas de precipitação sobre a cúpula do radar e atenuação das micro-ondas do radar pela própria precipitação, nuvens e gases atmosféricos. Com relação aos erros provocados pelas variações na relação  $Z$ - $R$ , pode-se dizer que, para tempestades de tipo similar, na mesma área geográfica, existem amplas variações na relação  $Z$ - $R$ .

Tais variações refletem a predominância de um ou outro processo físico que influencia a distribuição do tamanho da gota. Por isso as estimativas de chuva pelo radar são obtidas com uma regressão Z-R média. Quanto aos erros pela diferença na amostragem entre medidores de superfície e radar, pode-se dizer, que a concordância entre as estimativas de chuva obtidas por estes dois métodos decrescem com o aumento do alcance do radar. O aumento do volume de amostragem do radar e da altura do feixe em relação ao chão leva a uma maior probabilidade de que a precipitação observada no alto seja diferente daquela que alcança o chão e de que o feixe não seja uniformemente preenchido pela precipitação. Já que medidores de chuva de superfície (pluviômetros e pluviógrafos) são usados para ajustar as estimativas de radar, é importante considerar erros que possam ocorrer nas medidas obtidas por eles. A principal causa do erro seria turbulência e aumento do fluxo de vento sobre o medidor (WILSON e BRANDES, 1979).

De acordo com Antonio (1996) a rede paulista de radares Doppler, que observa chuva e vento, é formada pelos equipamentos operados pelo Instituto de Pesquisas Meteorológicas (IPMet) da Universidade Estadual Paulista (UNESP), que são: o sistema de radar meteorológico Doppler de Bauru, cujo início das operações se deu em maio de 1992 e o radar de Presidente Prudente que se constitui em um sistema essencialmente semelhante ao de Bauru, apenas com alguns avanços tecnológicos, cujas operações se iniciaram ao final de 1994 e se caracteriza por ser operado remotamente a partir do IPMet de Bauru. Os radares podem operar na tarefa de vigilância meteorológica fazendo monitoramento de precipitação, mediante levantamento qualitativo das informações de chuva dentro do raio de alcance, que é de 450 km. Essa informação denominada PPI (*Plan Position Indicator*) é coletada executando-se uma varredura completa da antena do radar, de 360 graus, com a elevação sendo mantida na direção do horizonte (zero grau). Ao lado da informação qualitativa pode-se obter a informação quantitativa. Para a tarefa de coleta de dados para quantificação, os radares de Bauru e Presidente Prudente executam uma varredura volumétrica ou “*volume scan*”. A cada volta completa da antena, a partir da elevação de zero grau, esta sofre incrementos positivos. De cada varredura a uma dada elevação, toma-se uma coroa circular cuja altura média do trecho corresponde ao nível que se deseja a informação. Trechos sucessivos de elevações sequenciais compõem um plano de altura quase constante. Esse produto é denominado CAPPI (*Constant Altitude Plan Position Indicator*). O limite de alcance é o raio de 240 km. A altitude rotineira de utilização de CAPPI é de 3,5 km, pois nesse nível as informações de radar já não estão sujeitas à contaminação por ecos de terreno.

O radar meteorológico de São Paulo está instalado junto à barragem de Ponte Nova no município de Biritiba-Mirim e começou a operar em modo experimental em setembro de 1988. A localização do radar foi definida em função dos custos de instalação, num local dentro de um raio de 100 Km em relação à cidade de São Paulo, em área de propriedade do DAEE, com máxima visada livre horizontal e com infraestrutura montada para que o radar pudesse ser operado 24 horas por dia. O sistema de aquisição de dados executa a cada 10 minutos uma varredura em azimute e elevação até 30° da atmosfera num raio de 240 Km. A varredura completa leva cerca de 4 minutos, sendo que o equipamento detecta até 0,5 mm/h a 190 Km do radar baseado na relação de Marshall-Palmer, a equação (3.2). Uma das informações disponibilizadas pelo sistema é o CAPPI, no qual se podem obter mapas das taxas de precipitação no intervalo de altitude de 1,5 a 18,0 Km, num raio de 180 Km e discretizadas em quadrículas de 2x2 Km (PEREIRA FILHO, 1989).

### **3.4.3 Eficiência do radar meteorológico para estimativas de precipitação**

Na literatura é uma constante o fato de se utilizar técnicas de calibração do radar como uma maneira de se obter uma melhor acuracidade nas medidas. Wilson e Brandes (1979) fizeram comparações entre alturas de chuva obtidas com os medidores de superfície e de radar e mostraram que o uso da tendência do radar (*mean radar bias*), que se constitui de uma técnica de ajuste das medidas de chuva pelo radar com medidores de superfície, diminui a diferença entre as estimativas de altura de chuva obtidas pelos dois métodos. A tendência do radar (*mean radar bias*) é a média das razões entre a altura de chuva, obtida por um medidor de superfície no local  $i$ , e a altura de chuva obtida pelo radar correspondente ao mesmo local  $i$  do medidor de superfície, para todas as posições.

Para estudar a resposta em tempo real de eventos de precipitação, de uma bacia urbanizada do Limão, na região metropolitana da Grande São Paulo, Pereira Filho (1989) utilizou o radar do CTH (Centro de Tecnologia Hidráulica), instalado na barragem de Ponte Nova, São Paulo. Utilizou o modelo estocástico linear de transformação chuva-vazão MELRAD, baseado no método das isócronas. Foram utilizadas a equação de Marshall-Palmer e uma equação proposta por Massambani e Rodriguez para sistemas convectivos tropicais, desenvolvida com dados do estado de São Paulo na conversão dos dados de refletividade do radar. O autor não observou diferenças significativas para as duas equações. As etapas de previsão foram baseadas na

metodologia SHARP (*SHort- term Automatic Radar Prediction*). O autor concluiu que esta metodologia é adequada para previsão de eventos com até uma hora de antecedência.

Antonio (1998) utilizou a técnica de ajuste de medidas de chuva com radar para a obtenção de relações Z-R com a utilização de disdrômetros. Nesta técnica o método de obtenção das relações Z-R é aquele utilizado por Antonio e Calheiros (1985) e denominado método estatístico para obtenção de relações Z-R hidrológicas. Já que o número de informações obtidas de um evento de precipitação por um disdrômetro é muito maior que aquele obtido por radar pelo fato do disdrômetro totalizar as medições da distribuição do tamanho de gotas a cada minuto, enquanto o radar faz uma varredura que demora alguns minutos, isso indica que o evento de precipitação medido pelo disdrômetro é muito melhor amostrado no ponto do que pelas medidas de radar. A partir disto, tem-se que a técnica de ajuste ou calibração das medidas de chuva pelo radar a partir de relações Z-R disdrométricas obtidas pelos eventos que trazem as características locais de precipitação, é a mais eficiente.

Um modelo de reanálise de campos de precipitação horários, obtidos por radares meteorológicos, por meio de um Esquema de Análise Objetiva Estatística (ANOBES) foi apresentado por Pereira Filho *et al.* (1998). Esta técnica foi aplicada a uma área do sudoeste do estado norte-americano de *Oklahoma* coberta por quatro radares meteorológicos WSR-88D, cujos campos de precipitação horários individuais foram combinados para produzir mosaicos digitais de precipitação e servida por uma rede de pluviógrafos de densidade relativamente alta denominada *Oklahoma Mesonet*. O Esquema de Análise Objetiva Estatística consiste em estabelecer sobre a área de estudo uma malha regular. A chuva analisada em cada ponto da malha é obtida somando-se a estimativa de chuva pelo radar no ponto da malha e a soma das diferenças ponderadas entre medidas de pluviógrafos das proximidades e as respectivas estimativas de chuva pelo radar. Os pesos são otimizados, tais que o erro da análise (diferença entre a chuva analisada em cada ponto da malha e o valor real da chuva em cada ponto da malha) é menor que o menor erro entre as medições (diferença entre a estimativa de chuva pelo radar/pluviógrafo). Os resultados obtidos mostraram que os mosaicos digitais de precipitação subestimam as acumulações totais de chuva em 40% quando comparado com a reanálise pelo Esquema de Análise Objetiva Estatística. Além disso, as maiores discrepâncias entre os mosaicos de dados e a reanálise coincidiram com as áreas de sobreposição de cobertura de cada WSR-88D, sendo que alguns altos gradientes de chuva fictícios também apareceram na borda da cobertura dos radares.

Calvetti *et al.* (2003) compararam os campos de precipitação na região metropolitana de Curitiba gerados a partir de dados do radar meteorológico do SIMEPAR e de uma rede de pluviômetros disponíveis na região, para eventos de grandes proporções que ocasionou inundações. Eles utilizaram o método ANOBES (análise objetiva estatística) para integrar as informações dos dois instrumentos de medida, que considera estatisticamente a influência da distância dos pluviômetros para cada pixel medido pelo radar. Para o radar usaram o CAPPI de 3 km de altitude, resolução de 4 km<sup>2</sup> e a equação de Marshall-Palmer. Foi feito um ajuste para compensar o deslocamento da tormenta entre as varreduras do radar. Os autores concluíram que o radar e a rede pluviométrica deram informações coerentes, observaram que as correções feitas pelo método ANOBES restritas às áreas que envolvem os pluviômetros e sugerem um adensamento de rede pluviométrica para melhorar as estimativas do campo de precipitação.

Antonio e Andrade (2007) apresentaram três eventos de inundação na bacia urbana do córrego Gregório, em São Carlos, SP e avaliaram a eficácia do radar meteorológico de Bauru no monitoramento, quantificação da precipitação àquela distância de São Carlos e também a validade da equação Z-R instalada, em uso no sistema de radar do IPMet, com os dados pluviométricos de uma estação da área. As correlações entre os dados coletados pelos dois equipamentos, durante os períodos das chuvas que provocaram as cheias, levaram a uma relação Z-R específica para tais casos. Os processamentos dos dados de refletividade de radar (Z) com a equação Z-R obtida dos eventos de cheias, determinaram valores de intensidade de precipitação (R) para cada varredura volumétrica efetuada. Com estas informações convertidas do radar, sobre a localização do pluviômetro, foi possível estabelecer o pluviograma de cada um dos casos de precipitação e compará-los com os dados de superfície, com diminuição da dispersão. A relação Z-R determinada representou bem a precipitação acumulada nos três eventos, quando comparados com os valores medidos na estação pluviométrica, na qual, as diferenças foram menores que 5%. O uso de uma relação Z-R clássica de Marshall-Palmer (1948) para quantificação por radar levou a uma subestimativa significativa dos totais precipitados, com diferenças atingindo mais de 81%. Com isso, os autores reafirmam a necessidade de se dispor de equações Z-R específicas, que incorporam o efeito da distância ao radar e outras características, como a estação do ano ou o período do dia, entre outras, para a adequada representação do campo de chuva por radar.

## **3.5 MODELOS HIDROLÓGICOS**

### **3.5.1 Definição dos modelos hidrológicos**

O modelo hidrológico é uma das ferramentas que a ciência desenvolveu, para melhor entender e representar o comportamento da bacia hidrográfica e prever condições diferentes das observadas. A simulação hidrológica é limitada pela heterogeneidade física da bacia e dos processos envolvidos, o que tem propiciado o desenvolvimento de um grande número de modelos que se diferenciam em função dos dados utilizados, discretização, das prioridades da representação dos processos e dos objetivos a serem alcançados (TUCCI, 1998).

Nos últimos anos, os modelos matemáticos têm estado presentes no desenvolvimento de diversas áreas do conhecimento humano, científico e das ciências naturais, sendo considerados como as mais sofisticadas ferramentas disponíveis para analisar questões com relação aos sistemas naturais representando os processos físicos, químicos, biológicos, sociais e econômicos em diversas escalas temporais. A importância dos modelos consiste, entre outros aspectos, em simular e prever os fenômenos físicos, obtendo relações de causa e efeito, sem que com isso se tenha efetivamente realizado alguma ação sobre o modelo físico real.

A literatura, de um modo geral, define modelo como uma simplificação de um sistema real, porém, segundo Christofletti (1999), a definição apresentada por (HAGGETT, 1967 e CHORLEY, 1975) permanece ainda a mais adequada, a qual define que “modelo é uma estruturação simplificada da realidade que supostamente apresenta, de forma generalizada, características ou relações importantes. Os modelos são aproximações altamente subjetivas, por não incluírem todas as observações ou medidas associadas, mas são valiosos por obscurecerem detalhes acidentais e por permitirem o aparecimento dos aspectos fundamentais da realidade”.

Segundo Mota (1999), o objetivo de um modelo hidrológico é determinar com eficiência e precisão, os componentes do ciclo hidrológico em uma bacia hidrográfica e estimar eficientemente o comportamento e a magnitude da água nos fenômenos menos frequentes. A importância e uso dos modelos hidrológicos são primordiais para apreciar, simular e prever os danos causados pelas inundações, planejar, projetar, administrar, auxiliar na tomada de decisão e na gestão dos recursos hídricos.

Com o desenvolvimento da tecnologia de informação, os modelos matemáticos hidrológicos têm tido sua utilização amplamente difundida, dado o desenvolvimento, disseminação e popularização das técnicas computacionais. No final da década de 50 e durante a década de 60 foram desenvolvidos os primeiros modelos hidrológicos, com destaque para: o SSARR (*Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation*) desenvolvido no *US Army Corps of Engineers* (ROCKWOOD, 1958), este modelo foi desenvolvido para simular o processo hidrológico (precipitação-vazão) e a regularização de vazão de um rio, utilizando funções que podem ser ajustadas; e modelo STANFORD IV (*Stanford Watershed Model-SWM*) (CRAWFORD e LINSLEY, 1966) este modelo possui duas estruturas básicas: (i) simulação na bacia (*Land Surface*) e (ii) simulação no canal (*Channel System*). A bacia hidrográfica a ser simulada é dividida em sub-bacias, o que permite separar as áreas segundo critérios de distribuição espacial da chuva e das características físicas da bacia, como cobertura vegetal, declividade e tipo de solo. Esses modelos procuram retratar o comportamento da bacia, interpretando qualitativamente, através de equações empíricas (TUCCI, 1987).

Depois do SWM, segundo Tucci (1998), outros modelos foram desenvolvidos seguindo linhas diferentes, podendo-se citar: (i) Modelo do MIT *Catchment Model* (HARLEY *et al.*, 1970), (ii) SACRAMENTO (BURNASH *et al.*, 1973); (iii) HYMO (WILLIAMS e HANN, 1973), (iv) HEC-1 (*Hydrologic Engineering Center*) Flood Hydrograph Package (US Army, 1973), (v) Modelo Mero (CLARKE, 1973), (vi) IPH II (TUCCI *et al.*, 1981) e (vii) SMAP (*Soil Moisture Accounting Procedure*) (LOPES *et al.*, 1981) e (viii) MODHAC (Modelo Hidrológico Auto-Calibrável) (LANNA & SCHWARZBACH, 1989).

Com o desenvolvimento de pesquisas visando um maior conhecimento do comportamento dos processos físicos na bacia hidrográfica e relacionados às questões ambientais, foram desenvolvidos modelos hidrológicos mais próximos da realidade física, o que permitiria avaliar os efeitos hidrológicos da modificação da cobertura das bacias. Neste grupo de modelos físicos estão: (i) SHE (*Système Hydrologique Européen*), desenvolvido em conjunto por três instituições européias (ABBOTT *et al.*, 1986), (ii) TOPMODEL (BEVEN e KIKBY, 1979) e buscou introduzir as relações físicas através de um número reduzido de parâmetros, (iii) TOPOG (*TOPOGraphy model* – O'LOUGHLIN, 1986), (iv) IDHM (*The Institute of Hydrology Distributed Model*) (BEVEN *et al.*, 1987).

Outros modelos hidrológicos buscaram representar não apenas a quantidade de água, mas também a qualidade da água e a produção de sedimentos nas bacias. Nesta categoria, podem ser citados os modelos: (i) CREAMS (*Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems*) (KNISEL, 1980); ANSWERS (*Areal Non-point Source Watershed Environment Response Simulation*) (BEASLEY e HUGGINS, 1980), (ii) SWRRB (*Simulator of Water Resources in Rural Basins*) (WILLIAMS *et al.*, 1985; ARNOLD *et al.*, 1990) e (iii) SWAT (*Soil & Water Assessment Tool*) (KING *et al.*, 1996).

A utilização de modelos matemáticos em recursos hídricos é baseada em três condições fundamentais: (i) objetivos do estudo, (ii) dados históricos disponíveis e (iii) metodologia proposta. Devido à complexidade dos fenômenos que ocorrem na bacia hidrográfica, a representação dos processos requer diferentes níveis de precisão de acordo com o objetivo do estudo. Em contrapartida, esta precisão depende da quantidade e qualidade dos dados disponíveis para aferir a metodologia; assim, o modelo hidrológico é escolhido de acordo com o objetivo do estudo, que definirá o nível de precisão desejado e os dados históricos e físicos disponíveis (TUCCI, 1987).

A modelagem de bacias hidrográficas trata-se de um instrumento importante na análise da complexa interação das variáveis de uma bacia hidrográfica, porém Christofolletti (1999) alerta que os modelos não constituem uma panacéia universal e que na aplicação de um modelo deve-se levar em conta suas limitações, mas sempre buscando a melhor maneira de superá-las. Dentre os principais problemas na aplicação de modelos o autor destaca: a avaliação da acuidade ou ajuste das suas previsões, o estabelecimento de valores aos parâmetros do modelo e a identificação destes valores com os parâmetros fisicamente mensuráveis no mundo real.

Além das limitações de um modelo, Christofolletti (1999) alerta ainda, que os modelos nunca podem substituir as observações de campo e os experimentos de laboratórios, mas podem aumentar em muito a sua eficiência, pois, à medida que um projeto de modelagem se desenvolve, deve haver uma interação entre os dados experimentais e o modelo, de forma tal que os dados experimentais possam ser utilizados para melhorar o modelo e que o modelo propicie o refinamento do programa de coleta de dados experimentais.

### 3.5.2 Classificação dos modelos hidrológicos

Existe grande variedade de modelos utilizados na Engenharia. Para melhor compreensão de suas finalidades, eles podem ser classificados segundo diferentes aspectos, podendo ser encontrado em Wood e O'Connell (1985), Tucci (1998), Zoppou (2001) e Hydrocomp (2006).

De forma geral, os modelos são classificados dentre outras formas, de acordo com o tipo de variáveis utilizadas na modelagem: (i) Determinístico e (ii) Estocástico; pelo tipo de relação entre estas variáveis: (iii) Empíricos e (iv) Conceituais; pela discretização espacial: (v) Concentrados e (vi) Distribuídos; pela forma de representação dos dados: (vii) Discretos ou Eventuais e (viii) Contínuos.

- modelos estocásticos e determinísticos: determinísticos são os modelos em que, para uma mesma entrada, o sistema produz sempre a mesma saída. Estocásticos são aqueles em que o relacionamento entre entrada e saída é estatístico, isto é, seguem alguma distribuição probabilística;

- modelos conceituais e empíricos: modelo conceitual é aquele em que as funções utilizadas na sua elaboração levam em consideração os processos físicos que estão envolvidos no fenômeno estudado. Os modelos do tipo “caixa preta” ou empíricos são os que ajustam os valores calculados aos dados observados, através de funções matemáticas, porém sem finalidade de explicar os processos envolvidos, são apenas representações de um ajuste matemático, que não possui nenhuma representação explícita dos processos físicos da bacia;

- modelos concentrados ou distribuídos: concentrados são os modelos cujos parâmetros de alimentação variam somente em função do tempo e são representados por equações diferenciais ordinárias com uma variável independente, assim para as variáveis meteorológicas e hidrológicas, bem como para os parâmetros são atribuídos valores médios representativos para toda a área, consistindo em uma simplificação importante da realidade. Modelos distribuídos são aqueles em que os parâmetros de alimentação variam também segundo o espaço geográfico, utilizando-se para representá-los equações diferenciais parciais com mais de uma variável independente. Portanto, os modelos distribuídos exigem uma discretização espacial, levando em consideração a variabilidade espacial das variáveis meteorológicas, hidrológicas e parâmetros dos modelos;

- modelos contínuos e discretos: contínuos quando os fenômenos que representam são contínuos no tempo, isto é, nos modelos contínuos, temos o período de simulação estendido a um amplo período, sendo determinada a simulação em todos os períodos, quer de cheia ou de seca. Discreto quando as mudanças de estado se dão em intervalos discretos, são modelos que representam um simples evento, dependendo da disponibilidade de dados, do evento a ser estudado e da precisão desejada.

Como exemplo de modelos do tipo determinístico temos os de precipitação-vazão, vazão-vazão e água subterrânea, podendo ainda os dois primeiros ser empíricos ou conceituais. Os modelos precipitação-vazão calculam as vazões de uma bacia hidrográfica a partir de uma série de dados de precipitação ocorrida sobre ela. É usado para complementação de séries de dados de vazões, dimensionamento, previsões em tempo atual e avaliação do uso da terra na bacia hidrográfica.

Os modelos vazão-vazão permitem o cálculo de vazões de uma seção a jusante a partir de um ponto a montante de um rio, possibilitando a extensão de séries de vazão, dimensionamento e também previsões de cheia.

Os modelos de água subterrânea sintetizam o movimento e a disponibilidade de água subterrânea a partir de dados de realimentação, bombeamento e características hidrodinâmicas do aquífero. São usados para o cálculo da capacidade de bombeamento, da distribuição do nível do lençol freático e na determinação de perímetros de irrigação.

Segundo Zoppou (2001), os modelos hidrológicos são aqueles afetos principalmente ao ciclo hidrológico e os hidráulicos modelam explicitamente o escoamento em canais. Este enfoque está relacionado ao processo modelado. De forma analítica, modelos hidrológicos satisfazem a equação da continuidade, enquanto modelos hidráulicos ou hidrodinâmicos, além da equação da continuidade, satisfazem também à equação da dinâmica.

### **3.5.3 Modelos hidrológicos distribuídos**

Os modelos hidrológicos distribuídos procuram representar a variabilidade espacial e temporal dos processos hidrológicos, conduzindo a um detalhamento espacial de fenômenos ou processos físicos para os quais dificilmente existem dados medidos nas bacias. Entretanto, para

sua aplicação, é necessário o conhecimento da distribuição espacial dos processos (TUCCI, 1998).

Esses modelos podem incorporar a distribuição espacial de várias informações e condições de contorno, como a topografia, vegetação, tipo e uso do solo, precipitação e evaporação do solo de uma bacia hidrográfica, obtidas por sensoriamento remoto (satélite ou radares a bordo de aeronaves instrumentadas), produzindo informações de saída como umidade do solo, fluxos subterrâneos e de superfície, distribuição vertical da água no solo, dentre outras (TROCH *et al.*, 2003 apud SILVA, 2005).

Segundo Ferreira (2004), os modelos distribuídos apresentam limitações de aplicação, pois exigem um banco de dados muitas vezes complexo e com enorme quantidade de informação. A montagem desses bancos de dados exige um trabalho oneroso, os quais são frequentemente comprometidos pelas diferentes escalas de tempo e espaço dos dados já existentes. Uma forma para minimizar este efeito é a utilização de modelo com estrutura semidistribuídos. Esses modelos apresentam informações gerais de algumas variáveis, que não comprometem a simulação dos aspectos desejados.

A qualidade do modelo distribuído é avaliada pela capacidade em representar melhor a variabilidade espacial do sistema, sujeito às condições também variáveis de entrada, como a precipitação. O grau de detalhamento está ligado diretamente às informações disponíveis e à precisão desejada para retratar a bacia. Um modelo distribuído pode apresentar resultados praticamente iguais aos de um modelo concentrado. Quanto ao ajuste dos valores simulados aos observados, somente o modelo distribuído permite estudar a variabilidade do comportamento físico de diferentes partes do sistema (TUCCI, 1998).

#### **3.5.4 Uso de modelos hidrológicos distribuídos no planejamento urbano.**

A drenagem urbana tem sido um dos principais veículos de deterioração das áreas urbanas. Os fatores são a própria concepção do sistema de drenagem pluvial e as ações externas, como a produção de resíduos sólidos e os padrões de ocupação urbana. Para que as soluções adotadas, no âmbito de engenharia, em drenagem urbana, não produza mais danos do que benefícios ao ambiente é necessário que sejam avaliados cenários de ocupação do espaço urbano e de risco de projeto, a partir de padrões de uso do solo e da projeção de tendência futura dentro

de horizontes de 10, 20 ou 30 anos. O risco é escolhido com base na capacidade de investimento e dos prejuízos potenciais (TUCCI e BERTONI, 2003).

Uma das principais etapas no planejamento da drenagem urbana é a simulação de alternativas. Essas simulações a serem realizadas abrangem diferentes cenários de ocupação da bacia (referidos à urbanização presente e futura) ou a diferentes padrões de ocupação da bacia. Os modelos utilizados nessas simulações são de dois tipos: (a) modelo chuva-vazão: modelo hidrológico que calcula a partir da precipitação a vazão resultante que entra nas galerias e canais; (b) modelo de rios, canais, galerias e reservatórios: modelo hidrológico ou hidráulico que simula o escoamento em canais, galerias e detenções (VILLANUEVA e TUCCI, 2001).

A utilização de modelos distribuídos surge da necessidade de estimar a vazão que aporta em diferentes pontos na rede de macrodrenagem e da grande variabilidade do grau e características da urbanização. Além do mais, a variabilidade acontece não só na condição atual da urbanização, mas também nos cenários de urbanização futuros adotados para planejamento.

As simulações de boa qualidade, obtidas através de estimativas de excelente precisão dos parâmetros dos modelos utilizados, garantem o adequado dimensionamento dos projetos e funcionamento das obras. Assim, os parâmetros do modelo hidrológico devem ser estimados com base em características físicas da bacia ou da rede de drenagem, seja por ausência de dados para ajuste ou para simular situações futuras. A partir disso é claro que há necessidade de dados fundamentalmente para dois fins: i) ajuste (calibração) dos modelos para simulação de situações atuais; ii) desenvolver relações entre valores dos parâmetros e características da bacia, fundamentalmente características da urbanização (TUCCI e BERTONI, 2003).

### **3.5.5 Calibração dos modelos hidrológicos e análise de sensibilidade**

Para a escolha de um modelo chuva-vazão, é necessário que sejam discutidas a calibração, a validação e a aplicação do modelo. A maior dificuldade consiste em selecionar um modelo apropriado para uma particular bacia hidrográfica, ou seja, a capacidade do modelo em reproduzir adequadamente os vários aspectos dos hidrogramas de saída que são de interesse do hidrólogo.

O processo de aplicação dos modelos pode ser dividido em etapas. Na primeira etapa são levantadas todas as informações necessárias e montados todos os bancos de dados para a

simulação. A segunda etapa representa a simulação do modelo. Essa etapa é dividida em duas fases: calibração e validação. A calibração é o processo de identificação de valores dos parâmetros que permitem a melhor simulação de um grupo de dados observados e pode ser classificada em dois tipos: calibração manual (tentativa e erro) e calibração automática. Portanto, o modelo é executado para reproduzir condições conhecidas de valores de variáveis de entrada e saída observados. A incerteza em relação à adequação de um modelo deve ser resolvida pelo teste de validação. A validação é definida como o processo de demonstração dos parâmetros estimados na calibração. Na validação procura-se observar se os valores dos parâmetros podem ser estendidos a outros grupos de dados, assim, demonstrando a adequação do uso do modelo e tornando legítimo o processo de simulação (FERREIRA, 2004).

Testes de sensibilidade podem indicar, através de resultados de simulação, os parâmetros mais sensíveis, ou seja, aqueles que causam maiores incertezas na variável de saída, definindo os parâmetros que deveriam ser medidos com maiores detalhes.

A análise de sensibilidade tem sido utilizada como uma ferramenta para guiar os passos na direção de uma modelagem mais eficiente, na medida em que se torna possível identificar as variáveis mais importantes e que apresentem potencial para serem medidas na escala da bacia. Na análise de sensibilidade, é interessante conhecer para que parâmetro ou combinação de parâmetros a saída do modelo é insensível. A região de insensibilidade é denominada de região de indiferença, que pode ser caracterizada a partir de uma superfície hiperbólica no espaço de parâmetros. A região de não identificação é descrita pelo tamanho e orientação do elipsóide (SOROOSHIAN *et al.*, 1983).

As metodologias de análise de sensibilidade permitem a quantificação dessas noções geométricas em índices computáveis que, por sua vez, descrevem várias propriedades da região de interesse. Talvez a característica mais importante seja o grau para o qual a não identificação está relacionada aos efeitos de compensação de variações simultâneas de dois ou mais parâmetros de saída do modelo. A matriz de reestruturação representa matematicamente a região de interesse, permitindo a derivação de índices de sensibilidade.

Sorooshian *et al.* (1983) introduziram o índice de sensibilidade, que é uma medida atribuída a cada parâmetro do modelo. O índice de sensibilidade é obtido a partir do quociente entre a sensibilidade do parâmetro do modelo e o parâmetro de sensibilidade condicional, que representa, para cada parâmetro  $i$  do modelo, em certa região de interesse, quanto o parâmetro

pode variar, enquanto permanecer dentro da região de indiferença, e os demais parâmetros forem mantidos fixos. Desta forma, o parâmetro de sensibilidade condicional não leva em conta os efeitos de compensação da variação simultânea de dois ou mais parâmetros na saída do modelo. O caso no qual o maior e o menor eixo do elipsóide, que descrevem a região de indiferença, são orientados ao longo da direção dos eixos dos parâmetros, significa que a matriz de reestruturação é uma matriz diagonal. O máximo que cada parâmetro  $i$  do modelo pode variar (permitindo que outros parâmetros variem livremente), enquanto permanece na região de indiferença, será dado pelo seu respectivo parâmetro de sensibilidade condicional. Geralmente o elipsóide estará orientado de outra forma, indicando interdependência e efeitos de compensação entre os parâmetros. Esse resultado significa que a matriz de reestruturação não é uma matriz diagonal. Neste caso, se todos os parâmetros são livres para variar simultaneamente, o parâmetro  $i$  do modelo será capaz de mover-se numa distância máxima dada pelo índice de sensibilidade do parâmetro, como derivado por Sorooshian *et al.* (1983).

### **3.6 MODELOS HIDROLÓGICOS APLICADOS EM BACIAS URBANAS**

Na realidade, a representação matemática dos processos hidrológicos é muito complexa. A variabilidade espaço-temporal da precipitação, evaporação, infiltração e do escoamento superficial, entre outras variáveis, bem como os mecanismos físicos envolvidos, dificultam a análise desses processos hidrológicos, mesmo qualitativamente. Assim sendo, um dos principais desafios dos hidrólogos atualmente está na busca de modelos mais complexos para descrever as variáveis hidrológicas e suas heterogeneidades espaços-temporais, que representem de forma mais fiel os parâmetros hidrológicos envolvidos utilizando bancos de dados reduzidos (SINGH, 1988).

Para realização de um bom planejamento urbano torna-se necessário o conhecimento dos fatores que influenciam o funcionamento hidrológico da bacia a ser estudada. Os modelos hidrológicos e hidráulicos podem auxiliar neste processo, desde que existam dados de boa qualidade para sua confiabilidade; no entanto, em pequenas bacias urbanas estes são praticamente inexistentes. Portanto, a intensificação do monitoramento e a avaliação do sistema de drenagem, nestas áreas, podem trazer subsídios à modelagem, de fundamental importância para a resolução de problemas.

Segundo Maksimovic (2001) os modelos são fisicamente baseados na análise dos processos em superfície e na rede de drenagem e suas performances estão relacionadas com o grau de detalhamento da rede, das características da superfície (topografia, características do solo, uso do solo, conectividade entre os elementos, entre outros).

Assim, podem-se destacar alguns modelos como: HEC-HMS, IPH II e SWMM-EPA, que serão sucintamente descritos a seguir. Eles representam o escoamento superficial, em canais e condutos, escoamento forçado ou sob-pressão, transporte de sedimentos, qualidade da água, estruturas hidráulicas, etc. Eles se diferenciam pela disponibilidade, equacionamentos, tipo de discretização utilizada, entre outros.

### **3.6.1 O Modelo HEC-HMS**

O sistema de modelagem hidrológica HEC-HMS (*Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modelling System*) desenvolvido pelo Centro de Engenharia Hidrológica do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (USACE-U.S. Army Corps of Engineers) é um *software* usado para modelar processo de chuva-vazão na bacia hidrográfica, aplicável a grandes áreas geográficas e a resolução de diversos problemas. Isto inclui a fonte de água da bacia do rio, a hidrologia das grandes inundações e o escoamento urbano ou natural de pequena bacia hidrográfica. Os hidrogramas produzidos pelo programa são usados diretamente ou conjuntamente com o outro *software* para estudos da disponibilidade da água, da drenagem urbana, da previsão do fluxo, do impacto futuro da urbanização, do projeto de reservatório, da redução dos danos da inundação, do regulamento das enchentes e a operação de sistemas de vertedores. A modelagem chuva-vazão é desenvolvida em três módulos pelo sistema HEC-HMS:

(i) Módulo Bacia: agrega as informações topológicas, hidrológicas e topográficas dos elementos hidrológicos definidos previamente pelo CRWR-PrePro, bem como os parâmetros físicos CN, escoamento superficial, escoamento direto na rede de canais principais (Muskingum);

(ii) Módulo Precipitação: é uma descrição no tempo e no espaço do evento precipitação a ser modelado e consiste de séries temporais de precipitação;

(iii) Módulo Controle: define o tempo para o evento precipitação e para o cálculo do hidrograma de saída.

Oliveira (2003) apresentou os resultados de estudos hidrológicos e hidráulicos desenvolvidos na bacia hidrográfica do rio Pararangaba, com área de 75,64 km<sup>2</sup>, situada no município de São José dos Campos, estado de São Paulo, Brasil, na qual se observa um processo intensificado de urbanização com frequente ocorrência de inundações. A metodologia utilizada para tal foi a obtenção dos parâmetros fisiográficos característicos da bacia, através de técnicas de geoprocessamento e a subsequente integração desses dados aos sistemas de modelagem hidrológica chuva-vazão, HEC-HMS, e de simulação hidrodinâmica da onda de cheia, HEC-RAS (*Hydrologic Engineering Center – River Modelling System*). Uma grade com os valores do parâmetro CN foi obtida, para a bacia hidrográfica, aplicando-se o CRWR-PrePro, a partir da união das informações presentes nos mapas de Uso e Ocupação do Solo e Geológico, seguindo-se a metodologia de integração desses planos de informação proposta pelo *Soil Conservation Service* (SCS) juntamente com os métodos de transformação de dados espaciais em formato vetorial para representação matricial. As técnicas de geoprocessamento aplicáveis à modelagem hidrológica de bacias urbanas foram apresentadas de forma integrada, o que permitiu a visualização planimétrica dos planos de inundação críticos (chuvas com período de retorno de 10, 50 e 100 anos) sobre a superfície física da bacia hidrográfica do rio Pararangaba. Os valores de lâminas d'água obtidos via modelagem hidrodinâmica ajustaram-se muito bem aos valores de lâminas observados no bairro Jardim Nova Detroit.

Tavares e Castro (2005) apresentaram a análise hidráulica do curso d'água principal de uma bacia hidrográfica, utilizando ferramentas de geoprocessamento em Sistemas de Informações Geográficas (SIG) associada à modelagem hidrológica e hidráulica de uma bacia para simulação de cenários de inundação, através da utilização do modelo HEC-HMS e do HEC-RAS. Como forma de aplicação da metodologia de simulação, realizaram o estudo de um trecho de aproximadamente 2,0 km do Rio Maranguapinho, localizado no município de Fortaleza, estado do Ceará, Brasil. Foram utilizadas cartas topográficas do município de Fortaleza, em escala 1:2.000, as quais foram editadas no programa de manipulação gráfica AutoCAD MAP 2000 e exportadas diretamente para o ArcView GIS 3.2. No ArcView, executou-se a composição do modelo digital do terreno, pelo processamento das informações, tendo como resultado a geração de um mapa característico da elevação do terreno. Obtido o Modelo Digital do Terreno (MDE), procedeu-se com a geração automática das sub-bacias e determinação das características fisiográficas e parâmetros requeridos pelo HEC-HMS, constituindo o esquema hidrológico contribuinte com o trecho, completado com a inserção dos dados meteorológicos, compostos pelos hietogramas de projetos relacionados a cada sub-bacia e as especificações de controle dos

cálculos para a realização das simulações. A aplicação do processo de simulação hidrológica se deu para os períodos de retorno de 10, 20, 50 e 100 anos, tendo como finalidade principal estimar as vazões máximas para a entrada no modelo hidráulico. Utilizando o programa AutoCAD MAP 2000, dividiu-se o curso d'água em 19 seções e, no caso em estudo, as vazões de interesse para a modelagem hidráulica correspondem àquelas com valores máximos calculados. Após serem processadas as informações no ArcView, utilizou-se o HEC-GeoHAS para exportar os dados para o HEC-RAS, onde se realizou a simulação hidráulica. Os resultados gerados pelo HEC-RAS foram exportados de volta ao ArcView, onde foram processados, fornecendo, como resultado, o mapa da planície de inundação. Com isso, os autores demonstraram as vantagens da simulação hidrológica e hidráulica, associada à utilização do geoprocessamento, para análises em projetos relacionados aos recursos hídricos, apresentando instrumentos concretos, para avaliação de cenários potencialmente inundáveis, permitindo a elaboração de políticas de ocupação e uso do solo urbano.

### **3.6.2 O Modelo IPH II**

O modelo IPH II faz parte de uma família de modelos desenvolvidos pelo IPH/UFRGS (Instituto de Pesquisas Hidráulicas / Universidade Federal do Rio Grande do Sul), sendo um modelo determinístico - conceitual de simulação chuva-vazão. O IPH II tem como uma de suas características, ser um modelo simples, com a manipulação de um número mínimo de parâmetros e baseado em metodologias bem difundidas. Este modelo é composto por três algoritmos principais. O primeiro é o de perdas por evapotranspiração e interceptação. A finalidade é determinar as proporções da precipitação que evaporam, permanecem retidas na vegetação, depressões e que resultam em escoamento. O segundo algoritmo realiza a separação do escoamento superficial e subterrâneo, para isso faz uso da equação de Horton. O último algoritmo modela a propagação do escoamento superficial e do subterrâneo. O escoamento superficial é modelado pelo histograma tempo-área da bacia em questão. Existe também uma opção da utilização de um histograma tempo-área sintético.

Rosa (2002) propôs a utilização dos Sistemas de Informações Geográficas juntamente com modelos chuva-vazão, mais especificamente o IPH II, para fins de determinação da influência do processo de urbanização na ação catalisadora dos grandes eventos de cheias. A metodologia proposta para tal foi a obtenção dos parâmetros do referido modelo através de

técnicas de geoprocessamento e a consequente integração destes dados ao modelo hidrológico chuva-vazão, como subsídios para a fase de simulação. A metodologia proposta foi aplicada a uma área urbana denominada Lote 3, apresentando uma área aproximadamente de 10 Km<sup>2</sup>, sendo 9% desse total composta de área urbanizada, na bacia do Rio Morto de Jacarepaguá, zona oeste do município do Rio de Janeiro. Este trabalho representa uma contribuição de ordem prática, de como as técnicas de geoprocessamento podem ser aplicadas em especial na modelagem hidrológica de bacias urbanas, de forma a auxiliar na rápida apropriação dos parâmetros fisiográficos. Assim, seguindo a conceituação dos parâmetros do modelo IPH II, estes foram adequados ao conhecimento da área e dessa forma, obteve-se um vetor de parâmetros, cujo coeficiente de determinação mostrou-se satisfatório para os eventos selecionados.

Moreira (2005) analisou o impacto de diferentes formas de medida da precipitação em saídas de modelos chuva-vazão, utilizando medidas de pluviômetros, estimativas de precipitação por radar e a integração destas medidas através de um esquema de análise objetiva estatística (ANOBES). Este método leva em conta as propriedades estatísticas do campo de precipitação para combinar medidas de pluviômetros com estimativas de precipitação por radar, tal que o erro de análise seja minimizado. As simulações hidrológicas foram realizadas com o modelo IPH II para 3 conjuntos de dados de precipitação como entrada do modelo: 1) pluviômetros, 2) chuva de radar, 3) medida de precipitação combinada através da ANOBES. A área escolhida para a realização do estudo foi a bacia do rio Barigüi de 279 km<sup>2</sup>, na região metropolitana de Curitiba, Paraná. Os resultados indicaram que as medidas de pluviômetros apresentam bons resultados para eventos de precipitação estratiforme. Por outro lado, simulações para eventos de precipitação com distribuição espacial irregular não apresentaram bom desempenho. Além disso, as simulações hidrológicas com precipitação estimada apenas pelo radar não apresentaram resultados satisfatórios, ora subestimando ou superestimando a vazão. Os melhores resultados foram produzidos com o campo de precipitação analisada com a ANOBES. Embora radares meteorológicos possam prover estimativas de precipitação com alta resolução espacial e temporal para modelos hidrológicos e outras aplicações de gerenciamento hídrico, eles precisam ser integrados com pluviômetros para melhorar a quantificação da precipitação.

### 3.6.3 O Modelo SWMM

SWMM é um dos modelos mais bem sucedidos desenvolvidos pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (*United States Environmental Protection Agency, US-EPA*) entre 1969 e 1971, após essa data sofreu diversas atualizações em 1975, 1981, 1988 (HUBER e DICKINSON, 1992). SWMM é um modelo dinâmico de simulação chuva-vazão usado para simulação de evento único ou contínuo, da quantidade e da qualidade do escoamento de áreas urbanas. O SWMM pode ser considerado como uma série completa de ferramentas que cobrem todos os aspectos da simulação da drenagem urbana: geração e propagação do escoamento, análise da qualidade da água superficial da bacia no sistema de drenagem e na recepção da água.

SWMM foi desenvolvido primeiramente em 1971 e tem-se submetido a diversos melhoramentos desde então. A edição atual, versão 5, é uma reedição completa da versão anterior. Funcionando sob Windows, SWMM 5 fornece um ambiente integrado editando dados de entrada na área de estudo, simulações hidrológica, hidráulica e de qualidade da água e visualização dos resultados em diversos formatos.

Em termos mais simples o programa é construído no formato dos seguintes “blocos”: 1) Bloco *Runoff* (escoamento); 2) Bloco *Transport* (transporte); 3) Bloco *Extran* (extensão do transporte); 4) Bloco *Storage/Treatment* (armazenamento/tratamento); 5) Bloco *receive*.

O bloco *Extran* é o único bloco que não simula a qualidade da água. A propagação do fluxo pode ser executada nos blocos *Runoff*, *Transport* e *Extran*, na ordem crescente de sofisticação. SWMM continua a ser usado extensamente em todo o mundo para planejamento, análises e projeto relacionados ao escoamento de chuvas intensas, aos esgotamentos combinados, aos esgotamentos sanitários e aos outros sistemas de drenagem em áreas urbanas, com muitas aplicações em áreas rurais também.

O bloco *Runoff* do SWMM opera sobre uma coleção de áreas da sub-bacia que recebem a precipitação, geram escoamento e cargas poluidoras. Uma parcela de propagação do SWMM transporta este escoamento através de um sistema de tubulações, dos canais, dos dispositivos de armazenamento/tratamento, das bombas e dos reguladores. O SWMM segue a quantidade e a qualidade do escoamento gerado dentro de cada sub-bacia, a taxa de fluxo, a profundidade de fluxo, a qualidade da água em cada conduto e canal durante o período da simulação, compreendido em etapas múltiplas de tempo.

A estrutura do modelo é apresentada em nove blocos, sendo quatro computacionais e cinco de serviços, além do bloco executivo. Evidenciando os blocos computacionais, encontrou-se o bloco *Runoff* referente à transformação de chuva em vazão, o bloco *Transport* referente ao transporte na rede de drenagem usando o método da onda cinemática, o bloco *Extran* referente à modelação hidrodinâmica em condutos e canais usando as equações dinâmicas completas de Saint Venant e o bloco *Storage/Treatment* ao tratamento da qualidade das águas. A estrutura dos blocos do modelo SWMM e suas inter-relações estão representadas na Figura 3.1.

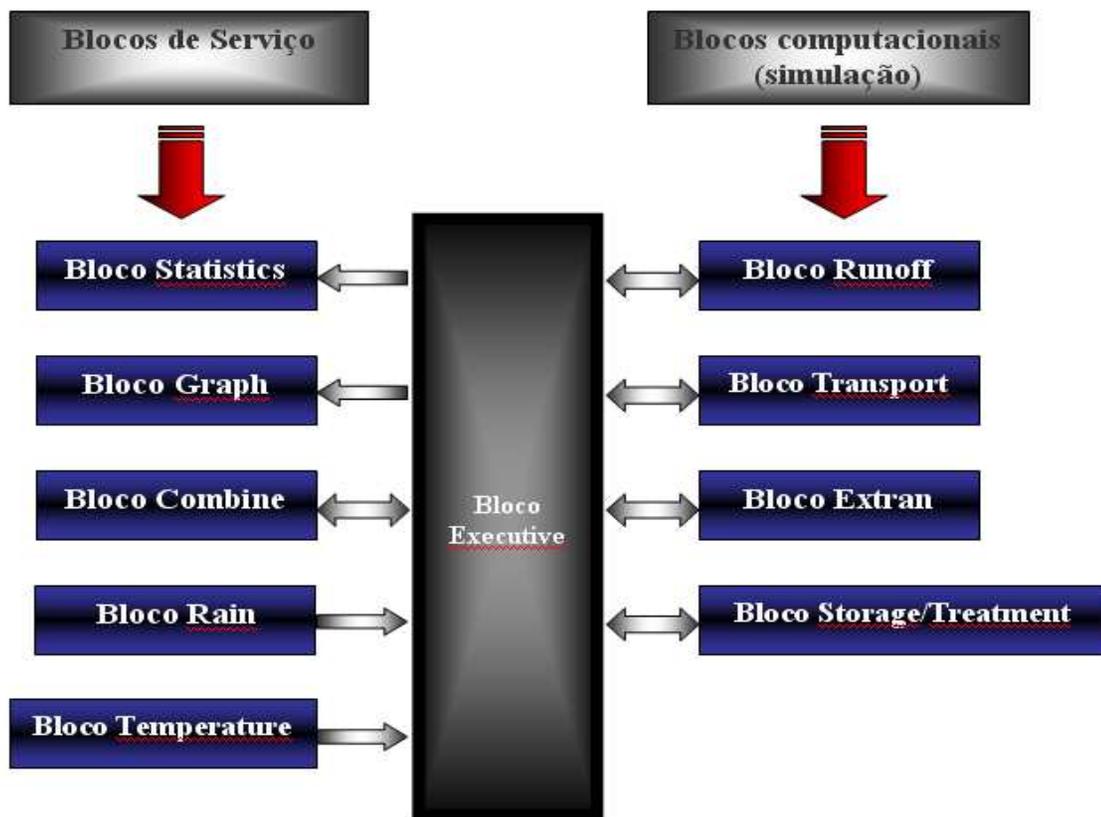


Figura 3.1: Relação entre os blocos estruturais do SWMM. Fonte: (HUBER e DICKINSON, 1992).

O bloco *Runoff* permite a simulação quali-quantitativa do escoamento gerado em áreas urbanas e sua propagação na superfície ou através de canais de forma simplificada. O bloco processa suas rotinas com base em dados de precipitação ou neve, simulando degelo, perdas devido à evaporação e por infiltração em áreas permeáveis (através das equações de *Horton*, *Green Ampt*, ou *Curve Number* do SCS), detenção na superfície, escoamento na superfície e em canais, podendo ser utilizado para simulações de eventos isolados ou contínuos.

A propagação do fluxo superficial é obtida através de um reservatório não-linear para cada subárea e pode ser representado pela combinação das equações de *Manning* e da continuidade, que podem ser escritas conforme a equação (3.3).

$$\frac{dd}{dt} = i * - \frac{W}{A.n} (d - dp)^{\frac{5}{3}} S^{\frac{1}{2}} \quad (3.3)$$

Na qual:

$i^*$  = precipitação efetiva (mm/h);

$W$  = largura da sub-bacia (m);

$A$  = área da sub-bacia (m<sup>2</sup>);

$n$  = coeficiente de rugosidade de *Manning*;

$d$  = profundidade da água no reservatório (m);

$dp$  = altura do armazenamento (m);

$S$  = declividade da sub-bacia (m/m);

$t$  = tempo (s).

A equação (3.3) diferencial não-linear pode ser resolvida para valores de  $d$  desconhecidos, através do processo iterativo de Newton-Raphson, pois o mesmo aproxima a equação diferencial a um reservatório não-linear. Para a simulação hidrológica chuva-vazão no bloco *Runoff*, as exigências dos dados incluem a precipitação, área da sub-bacia, largura representativa da sub-bacia (um fator de forma), coeficiente de rugosidade de *Manning*, declividade da sub-bacia, altura do armazenamento em depressões e parâmetros de infiltração. As sub-bacias são subdivididas em áreas permeáveis e impermeáveis. A largura representativa das sub-bacias é um parâmetro do modelo e provoca alterações no hidrograma, ocasionando efeitos de armazenamento e atenuação nestes (HUBER e DICKINSON, 1992).

O *Extran* foi desenvolvido na cidade de San Francisco em 1973. Foi chamado naquele tempo de San Francisco Model, mais precisamente, *WRE Transport Model*. Em 1974, EPA adquiriu este modelo e incorporou-o ao SWMM, com a finalidade de acrescentar um módulo alternativo para a propagação do escoamento, em redes de condutos e canais, chamando-o de *Extended Transport Model - Extran* para distingui-lo do bloco *Transport* desenvolvido pela Universidade da Flórida como parte do pacote original do SWMM. O módulo *Transport* propaga o escoamento na rede de drenagem segundo o conceito da onda cinemática, o *Extran* acrescentou

uma rotina mais sofisticada e complexa, possibilitando a simulação de condutos sob pressão (ROESNER *et al.*, 1992).

O Extran é um modelo dinâmico de propagação do escoamento resolvendo as equações dinâmicas completas de Saint Venant, tendo a vazão e a cota piezométrica como variáveis. A solução se dá por meio de um esquema explícito adiantado no passo do tempo, segundo o método de Euler modificado. Nas simulações são utilizados intervalos de tempo pequenos, menores que 60 segundos, fazendo com que o tempo de simulação seja uma variável importante no uso do modelo (ROESNER *et al.*, 1992).

O bloco simula redes ramificadas, remanso, fluxo superficial livre, fluxo sob pressão e fluxo reverso. O sistema de drenagem é idealizado como uma série de vínculos (*links*) que são conectados aos nós. Os vínculos (*links*) transmitem fluxo entre os nós, sendo a vazão a variável dependente, os nós têm características de armazenamento, sendo a equação da continuidade aplicada aos nós e a equação da quantidade de movimento ao longo dos vínculos (*links*). A equação dinâmica utilizada pelo modelo é escrita da seguinte forma:

$$Q_{t+\Delta t} = \frac{1}{1 + (g.n^2.\Delta t)\frac{|V|}{R_h^{-4/3}}} \left\{ Q_t + 2.\bar{V}\left(\frac{\Delta A}{\Delta t}\right)_t + \bar{V}^2\left[\frac{(A_2.A_1)}{L}\right].\Delta t - g\bar{A}\left[\frac{H_2.H_1}{L}\right].\Delta t \right\} \quad (3.4)$$

Na qual:

Q = vazão (m<sup>3</sup>/s);

g = aceleração de gravidade (m/s<sup>2</sup>);

R<sub>h</sub> = raio hidráulico (m);

A = superfície da seção transversal do conduto (m<sup>2</sup>);

L = comprimento do conduto (m);

H = cota piezométrica (m);

V = velocidade no conduto (m/s).

Na equação (3.4), V, R<sub>h</sub> e A são as médias ponderadas dos valores do conduto no tempo t e (ΔA/Δt) é a derivada no tempo para o intervalo de tempo anterior. As variáveis desconhecidas na equação (3.4) são Q<sub>t+Δt</sub>, H<sub>2</sub> e H<sub>1</sub>. As variáveis V, R<sub>h</sub> e A podem ser relacionadas com Q e H. Conseqüentemente, outra equação é requerida relacionando Q e H. Esta pode ser obtida escrevendo a equação da continuidade aplicada aos nós:

$$H_{t+\Delta t} = H_t + \sum \left( \frac{Q_t \cdot \Delta t}{A_{st}} \right) \quad (3.5)$$

Na qual:

$A_s$  = área superficial do nó ( $m^2$ );

$\Delta t$  = intervalo de tempo (s).

As equações (3.4 e 3.5) podem ser resolvidas iterativamente para determinar a vazão em cada vínculo e a altura (cota piezométrica), em cada nó, sobre o passo de tempo  $\Delta t$ . A integração numérica destas duas equações é realizada pelo método de Euler modificado.

No anexo A é descrito em detalhe o modelo SWMM, podendo ser visualizados os equacionamentos e as soluções utilizadas pelo programa.

Zaghloul (1983) analisou a sensibilidade dos parâmetros para os blocos *Runoff* e *Transport*, também investigou o nível de discretização aceita na simulação do escoamento superficial em uma área urbana, verificando o efeito da redução do número de sub-bacias na precisão de simulação do modelo SWMM. Para a análise de sensibilidade Zaghloul (1983) determinou uma área hipotética constituída de 25 sub-bacias de 11,48 acres cada. O hietograma aplicado à bacia foi da forma triangular com intensidade de pico de 101,6 mm/h e duração de uma hora. O efeito da variação dos parâmetros no hidrograma simulado foi verificado através da forma do hidrograma, da vazão, do tempo de pico e do volume escoado. No bloco *Runoff* foram analisados os parâmetros de infiltração, armazenamento em depressões, declividade do solo, coeficiente de rugosidade de *Manning*, porcentagem de impermeabilização e largura das sub-bacias. Os parâmetros mais sensíveis foram a porcentagem de impermeabilização e a largura da sub-bacia. A taxa de infiltração apresentou uma sensibilidade maior para as áreas com baixa porcentagem de impermeabilização, principalmente para o volume escoado. O armazenamento em depressões também apresentou uma sensibilidade maior para o volume escoado. O parâmetro de declividade do solo que depende da topografia foi mais sensível tanto para a vazão de pico como para o volume nas regiões mais planas. O coeficiente de rugosidade de *Manning* apresentou maior sensibilidade para a vazão de pico e o volume escoado nas áreas de menor rugosidade. No bloco *Transport* foram analisados o efeito do comprimento dos canais, o número de canais, condições de descarga, a declividade dos canais e o coeficiente de rugosidade dos canais. Para

este bloco foi encontrada maior sensibilidade para o comprimento dos canais e para o coeficiente de rugosidade de *Manning*.

Zaghloul (1983) também realizou um estudo do nível de discretização para o escoamento superficial e em redes de drenagem urbana. Neste estudo foram utilizados os blocos *Runoff* e *Transport* em áreas hipotéticas e reais. A bacia hipotética estudada possui área total de 643 acres e 50% de impermeabilização foram analisados três níveis de discretização 37, 5 e 1 sub-bacias. Para a obtenção dos parâmetros das bacias agregadas foi adotada a média ponderada das bacias agrupadas. Para largura da sub-bacia foi adotada a soma das larguras das bacias agrupadas para a discretização em 5 sub-bacias. Entretanto, para a bacia única essa soma teve que ser reduzida para induzir mais armazenamento na superfície, compensando a exclusão do armazenamento no canal. Foram estudadas bacias reais em que suas áreas variaram de 10 a 542 acres sendo analisados vários graus de discretização. Para a bacia hidrográfica Bannatyne no Canadá, situada a noroeste da cidade de Winnipeg, com área de 542 acres e 36% de impermeabilização, foram analisados três níveis de discretização 41, 3 e 1 sub-bacias. O aumento na vazão de pico e o adiantamento do pico são observados para a bacia com pouca discretização. Os aumentos da vazão de pico foram de 10 e 20% respectivamente para as simulações de 3 e 1 sub-bacias.

Selvalingam *et al.* (1987) aplicaram o modelo SWMM na bacia hidrográfica urbana de Bukit Timah em Singapura, com área de 6,11 km<sup>2</sup>. A área de drenagem foi discretizada em 19 sub-bacias e 19 canais entre retangulares e trapezoidais. Para a simulação foram utilizados dois dos quatro blocos computacionais, o *Runoff* e o *Extran*. As sub-bacias simuladas apresentaram porcentagens de impermeabilização entre 0 e 55% e declividades variando entre 0,02 e 0,102% para as sub-bacias. Os parâmetros obtidos na calibração de rugosidade de *Manning* foram de 0,028 e 0,35 para as áreas impermeáveis e permeáveis, respectivamente, e o armazenamento em depressões foi de 2,5 mm e 7,5 mm para as áreas impermeáveis e permeáveis respectivamente. Os parâmetros de infiltração de Horton variaram de 50 a 70 mm/h e de 2,0 a 5,0 mm/h para a infiltração inicial ( $I_0$ ) e infiltração mínima ou final ( $I_b$ ) respectivamente, o parâmetro de decaimento de Horton variou entre 0,00007 e 0,00112 s<sup>-1</sup>. A calibração do bloco *Extran* foi realizada nos 19 trechos. O comprimento dos trechos variou entre 92 e 1300 m, os coeficientes de rugosidade variaram entre 0,028 e 0,056. Os resultados mostraram que o SWMM é um modelo sofisticado capaz de avaliar um vasto conjunto de parâmetros, apresentando um bom desempenho para a simulação do sistema de drenagem urbana para a bacia estudada.

Tsihrintzis e Hamid (1998) examinaram a aplicabilidade do bloco *Runoff* do SWMM em pequenas bacias urbanas subtropical com ênfase nos parâmetros usados para calibrar o modelo.

Balascio *et al.* (1998) utilizaram algoritmo genético para calibrar o bloco do *Runoff* do SWMM. Uma função multiobjetiva foi desenvolvida utilizando-se de pesos especificados pelo usuário para estimar o erro no pico da taxa do fluxo, no volume do escoamento e no tempo do pico. O algoritmo genético provou ser uma ferramenta valiosa para isolar a vizinhança do conjunto de parâmetro ótimo. Um esquema convencional de calibração foi usado para o modelo, utilizando primeiramente um evento de baixa intensidade que produzisse somente o escoamento das áreas impermeáveis. Depois que os parâmetros para áreas impermeáveis foram encontrados, um evento maior foi usado para determinar as variáveis para as áreas permeáveis. O modelo calibrado foi usado para simular duas tempestades obtendo boa exatidão.

Shen *et al.* (1999) propôs o modelo fuzzy de rede neural chamado "*FUZZY STORMNET*" para estimar o fluxo volumétrico da intensidade da chuva. A estimação do fluxo para esse modelo pode ser calibrada automaticamente, através somente do conhecimento dos eventos de chuva, pois não era necessário nenhum conhecimento de campo e do sistema de drenagem.

Hsieh e Wang (1999) introduziram um modelo conceitual semidistribuído de chuva-vazão paralelo à superfície. Para avaliar a adaptabilidade deste modelo, três bacias em torno da cidade de Taipei em Formosa foram escolhidas para testar a eficácia do modelo.

Choi e Ball (1999) apresentaram um sistema de suporte a decisão para estimar a otimização dos valores dos parâmetros de controle do modelo. SWMM foi usado para simular a resposta de escoamento de uma bacia urbana, empregando ARC/INFO e um algoritmo de otimização para realçar a manipulação de dados espaciais e para otimizar os parâmetros de controle do modelo.

Hsu *et al.* (2000) desenvolveu um modelo de inundação urbana baseada em uma rede de drenagem, combinando o modelo SWMM e o modelo difuso bidimensional (2D). O SWMM foi utilizado para calcular o escoamento nas redes de drenagem e para fornecer os hidrogramas de descarga de fluxo do escoamento superficial que excede a capacidade da rede de drenagem, isto é, a sobrecarga sobre os poços de visita.

Joksimovic *et al.* (2002) aplicaram o *software* XP SWMM para calibração do modelo de um grande sistema de esgotamento urbano, na cidade de Ottawa, Canadá, usando a informação da precipitação obtida por radar. Em geral, os picos de fluxo e os volumes medidos e simulados do evento combinaram bem. Os volumes medidos e simulados do evento estavam dentro de uma variação de 15%.

Garcia *et al.* (2004) avaliaram o grau de discretização que deve ser empregado na bacia, identificando o ganho de qualidade na representação dos eventos observados, através da utilização do modelo hidrológico SWMM. O trabalho foi realizado em uma bacia hidrográfica urbana, com área de 4,95 km<sup>2</sup>, na cidade de Santa Maria – RS, utilizando dados de monitoramento hidrológico. Na avaliação da discretização foram propostas três alternativas, a bacia concentrada e subdividida em sete e onze sub-bacias. Os autores apresentaram o resultado das simulações de três eventos monitorados entre novembro de 2003 e maio de 2004. Os resultados obtidos nas simulações foram avaliados através das funções de estimativa do erro no tempo de pico, na vazão de pico e no volume entre os hidrogramas simulados e os observados na estação Cancela. Para a bacia concentrada os resultados obtidos não foram tão satisfatórios no ajuste dos hidrogramas, com coeficiente de determinação médio R<sup>2</sup> de 0,42. Já as bacias discretizadas, em sete e onze sub-bacias, proporcionaram uma melhor representatividade dos processos hidráulicos e hidrológicos ocorridos na região estudada, com coeficientes de determinação R<sup>2</sup> maiores que 0,92. Entretanto, os dois graus de discretização não apresentaram diferenças significativas entre si. Portanto, os autores concluíram que uma maior divisão da bacia, sem um aumento no detalhamento dos parâmetros, nem sempre significa mudanças ou melhorias no ajuste dos hidrogramas.

Garcia e Paiva (2005) avaliaram o impacto que o processo de urbanização causa nos eventos de cheia em uma bacia urbana. Foi analisada a bacia hidrográfica do Arroio Cancela, com área de 4,95 km<sup>2</sup>, com monitoramento hidrológico, na cidade de Santa Maria, RS, Brasil. O monitoramento consiste em duas estações, uma fluviográfica e a outra pluviográfica. Para análise do uso do solo foi adquirida, em maio de 2004, uma imagem do satélite Ikonos com resolução de 1 metro. O modelo SWMM foi utilizado nas simulações, sendo a área subdividida em 18 sub-bacias e utilizado módulo hidrodinâmico para a propagação no rio, de forma a obter discretização adequada ao grau de crescimento populacional previsto. Para a situação atual da bacia o modelo SWMM foi calibrado para os eventos de cheia, monitorados entre dezembro de 2003 e outubro de 2004, obtendo um coeficiente de correlação médio de 0,96. Após a obtenção dos parâmetros

calibrados, foram simulados três cenários futuros de urbanização, cenário 1, 2 e 3, os quais foram determinados com base nos dados obtidos do zoneamento, especificados no Plano Diretor Urbano de Santa Maria (1980), no Projeto de Lei do Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano Ambiental (PDDUA) e nos valores de taxas de impermeabilização obtidos para uma área real da bacia, respectivamente. Os cenários 1, 2 e 3 apresentaram aumento na vazão de pico e no volume escoado de 31,8% e 31,9%, 20,8% e 21,4%, 60% e 59%, respectivamente. Os aumentos, na vazão de pico e no volume escoado, verificados nos cenários mostram a necessidade de legislações rígidas e bem elaboradas que conduzam a urbanização a um crescimento sustentável.

## 4 MATERIAL E MÉTODO

### 4.1 MATERIAIS

#### 4.1.1 Características gerais da área de estudo

##### 4.1.1.1 Localização

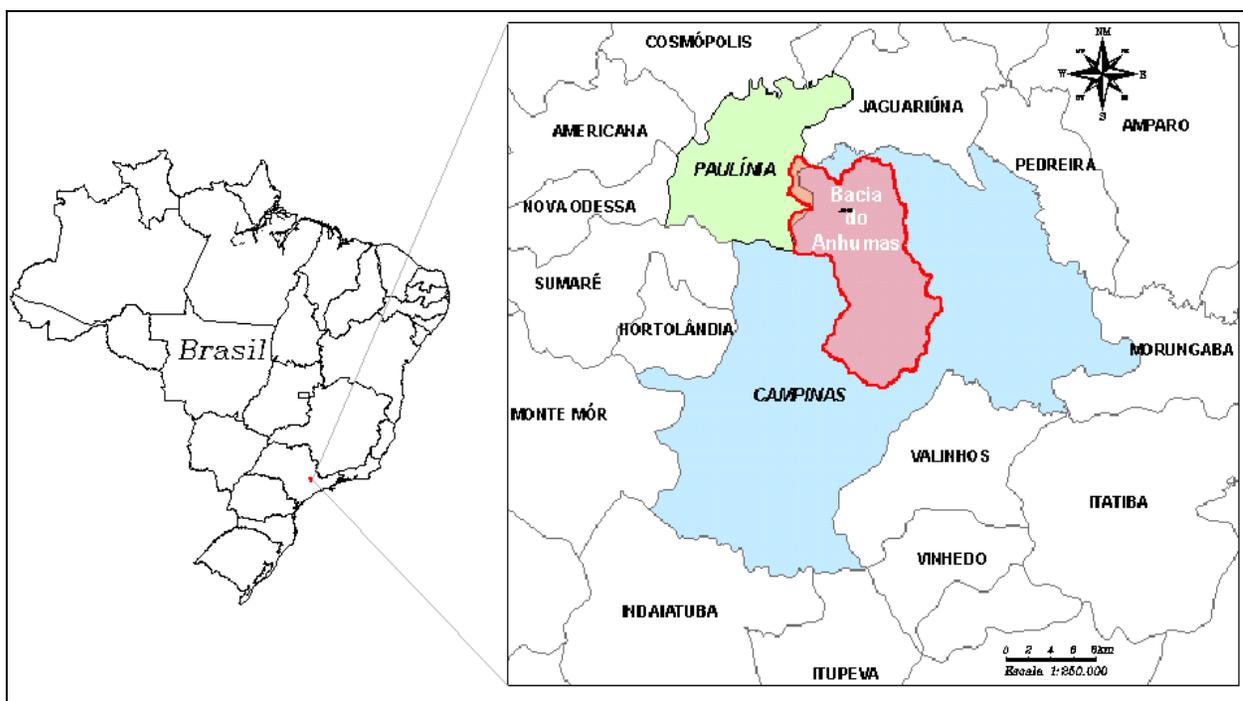


Figura 4.1: Localização da Bacia Hidrográfica do Ribeirão das Anhumas e os limites dos municípios. A Bacia abrange parte do município de Paulínia e a maioria está no município de Campinas. Fonte:(SEPLAMA, 2007)

A área em estudo pertence à bacia hidrográfica do Ribeirão das Anhumas que ocupa a porção central do município de Campinas, estado de São Paulo, Brasil, está circunscrita pelas coordenadas geográficas 22° 45' e 22° 56' de latitude sul e 46° 58' e 47° 07' de longitude oeste,

correspondendo a uma superfície de 15.017,88 ha ou 150,2 km<sup>2</sup>, Figura 4.1. A bacia do Ribeirão das Anhumas está incluída na grande Bacia do Rio Piracicaba através de seu afluente da margem esquerda do rio Atibaia, drena áreas dos municípios de Campinas e Paulínia. Dessa forma, o Ribeirão das Anhumas está incluído numa importante Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRH) do estado de São Paulo, a unidade 5, formada pela bacia de três importantes rios, o Piracicaba, Capivari e Jundiá (PCJ).

#### **4.1.1.2 Geologia**

A região da bacia hidrográfica do Ribeirão das Anhumas está assentada sobre aluviões do período quaternário, diabásios de idade jurássico-cretácea que ocorrem sob a forma de *sills*, gnaisses do período proterozóico médio (complexo de Itapira), arenitos ritmitos de compostos de siltitos, argilitos, arenitos finos que constituem áreas restritas do Subgrupo Itararé dentro do domínio de rochas metamórficas do complexo de Itapira e hornblenda-biotita granitos porfiríticos da suíte granítica Jaguariúna (INSTITUTO GEOLÓGICO, 1993) apud (TORRES *et al.*, 2006).

#### **4.1.1.3 Clima e Geomorfologia**

O clima regional é, segundo a classificação Köppen, Cwa, mesotérmico de inverno seco, com total de precipitação anual de 1381 mm, deficiência hídrica de 16,7 mm (junho-setembro) e excedente hídrico de 361,1mm (novembro-março). O regime hídrico dos solos é bem drenado e údico. Situa-se em uma área de transição do Planalto Paulista e a Depressão Periférica Paulista. Ao norte e a nordeste da bacia ocorre, predominantemente, o relevo das colinas amplas, apresentando-se como uma superfície contínua e pouco dissecada, com inclinação em direção ao Rio Atibaia. A leste encontram-se colinas médias e amplas, as quais apresentam-se mais elevadas na medida em que esse relevo é sustentado por rochas mais resistentes; colinas pequenas e morrotes, que se mostram mais dissecadas e conseqüentemente com formas menores do que as colinas e morrotes, estando nas bordas da Depressão Periférica; e colinas e morrotes que apresentam blocos rochosos esparsos por todo o terreno, que refletem o substrato gnáissico que o suporta. As planícies aluvionais apresentam, com raras exceções, superfícies reduzidas (TORRES *et al.*, 2006).

A bacia hidrográfica do Ribeirão das Anhumas corta o município de Campinas no sentido Sul-Norte e tem aproximadamente 70% de sua área localizada no perímetro urbano. Os remanescentes de vegetação nativa ocupam menos de 3% do território da bacia hidrográfica.

#### **4.1.1.4 Uso e ocupação do solo**

O crescimento urbanístico da cidade de Campinas é regido pela lei nº 6031/88, que dispõe sobre uso e ocupação do solo. O uso do solo é dividido em cinco categorias: comercial, habitacional, serviços, industrial e institucional. Cada categoria foi dividida em subcategorias que apresentam parâmetros específicos de ocupação do solo como: afastamento, altura máxima das edificações, taxa de ocupação do solo, coeficientes de aproveitamento, recuos, entre outros.

Ainda assim, o Plano Diretor de Campinas de 1996, subdividiu o município em sete macrozonas, que se diferenciam por suas características de dinâmica de desenvolvimento, as quais foram subdivididas em 37 áreas de planejamento (APs). As APs constituem recortes espaciais delimitados em função da dinâmica de estruturação urbana e da inter-relação dos problemas localmente identificados. Desta forma, apresentam diferentes extensões territoriais e contingentes populacionais, que variam segundo o grau de consolidação e a complexidade urbana. Cada área de planejamento é composta por unidades territoriais básicas (UTB's), que apresentam características semelhantes de uso e ocupação do solo.

#### **4.1.2 Características físicas da bacia hidrográfica Ralph Stettinger**

A estrutura pedológica predominante da bacia hidrográfica em estudo, Ralph Stettinger, é o argissolo vermelho-amarelo. Os argissolos apresentam textura variável de arenosa a média, em superfície, sobre média e argilosa em subsuperfície. Os argissolos da área em estudo são em geral profundos e, mais raramente, pouco profundos, estes últimos nas áreas de relevo mais ondulado relacionados ao embasamento cristalino. São solos mais frequentemente bem drenados, quando de textura mais grossa e pequena relação textural B/A (TORRES *et al.*, 2006).

Os mapas, pedológico, planialtimétrico e de uso e ocupação do solo da área em estudo, pertencente à bacia do Ribeirão das Anhumas, apresentados neste trabalho são do Programa de Pesquisa em Políticas Públicas realizado em parceria pelo IAC (Instituto Agrônomo de

Campinas), UNICAMP (Universidade Estadual de Campinas), PMC (Prefeitura Municipal de Campinas), IF (Instituto Florestal) e UnB (Universidade de Brasília). As representações do relevo e da estrutura pedológica da área em estudo podem ser visualizadas nas Figuras 4.2 e 4.3.

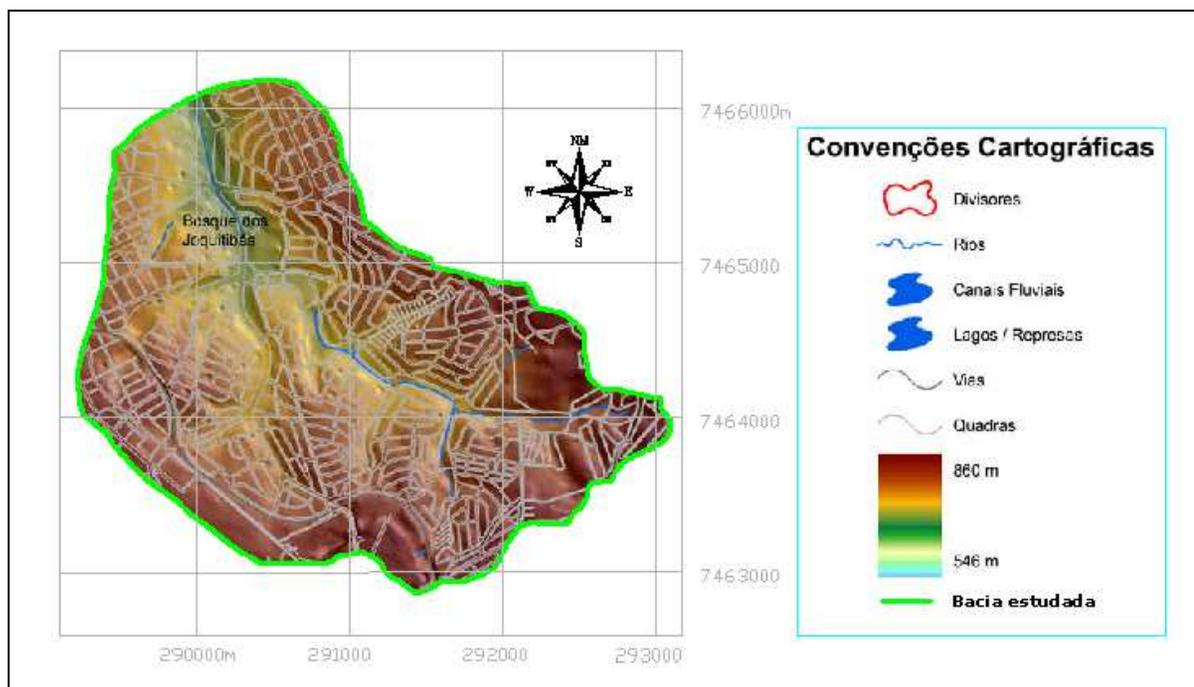


Figura 4.2: Mapa Planialtimétrico da área da bacia em estudo, Ralph Stettinger. Fonte: (TORRES *et al.*, 2006).

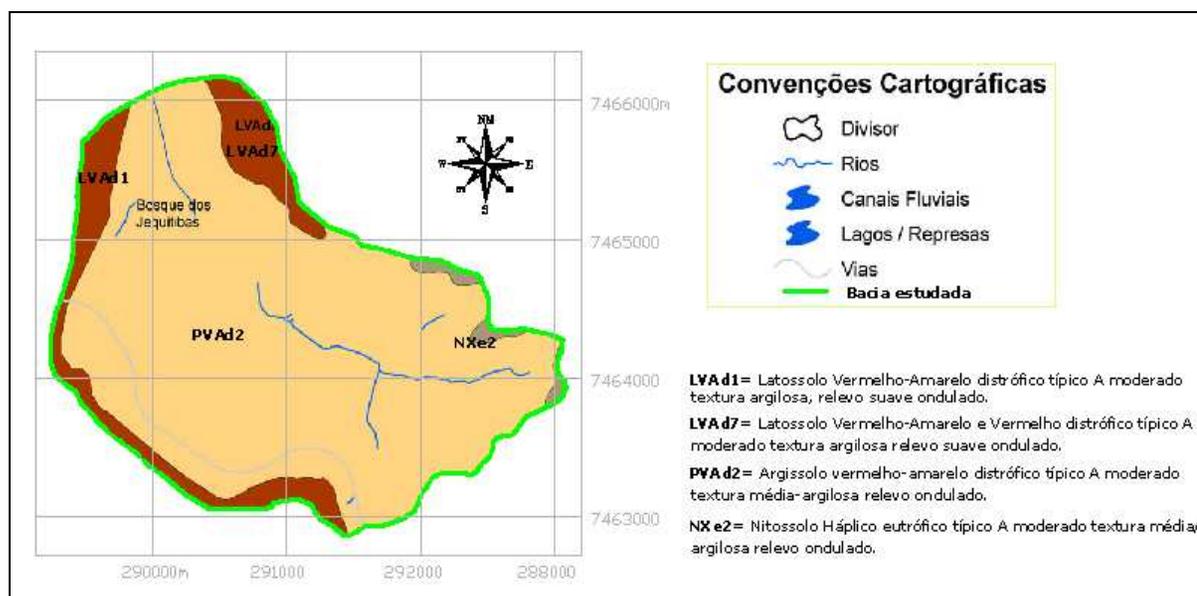
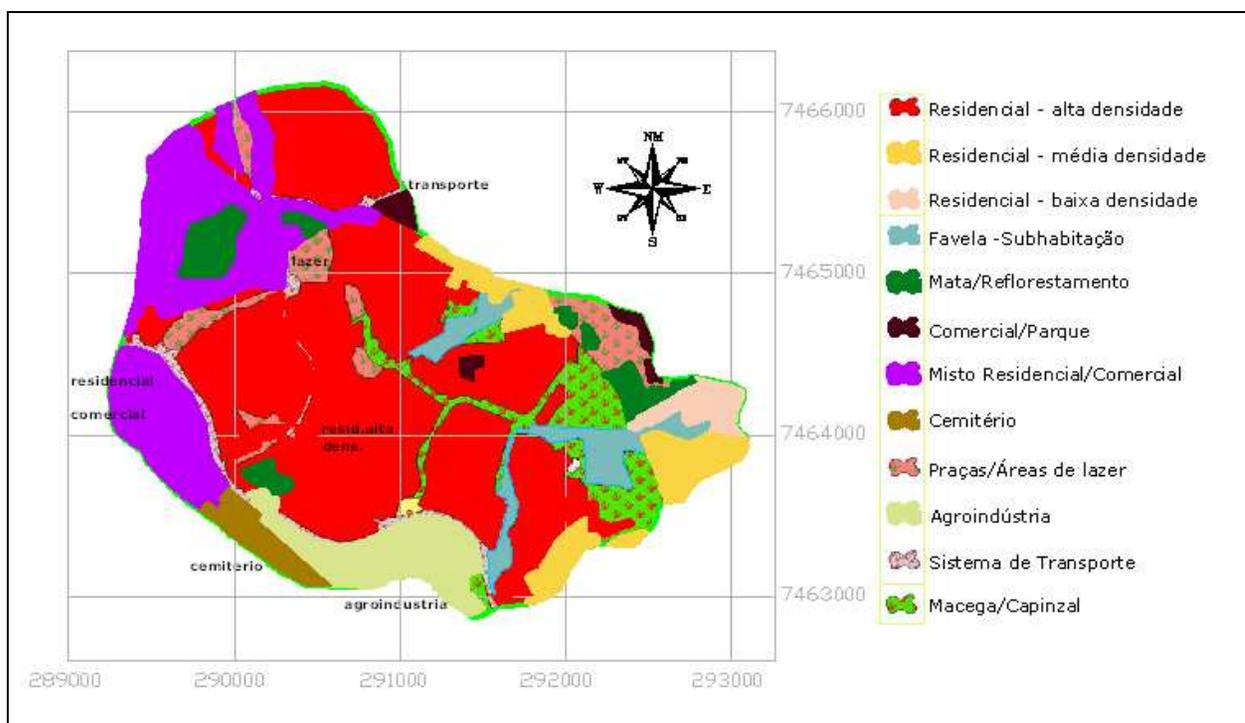


Figura 4.3: Mapa Pedológico da área da bacia em estudo, Ralph Stettinger. Fonte: (TORRES *et al.*, 2006).

Conforme visualizado na Figura 4.3, a estrutura pedológica da bacia em estudo é composta por: 8,4% de solo LVAd1: Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico típico A moderado textura argilosa relevo suave ondulado; 4,8% de solo LVAd7: Latossolo Vermelho-Amarelo e Vermelho distrófico típico A moderado textura argilosa relevo suave ondulado; 85,4% de solo PVAd2: Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico típico A moderado textura média/argilosa relevo ondulado; e 1,4% de solo NXe2: Nitossolo Háptico eutrófico típico A moderado textura média/argilosa relevo ondulado. O uso e ocupação do solo da bacia em estudo podem ser visualizados na Figura 4.4, a seguir:



**Figura 4.4: Mapa de Uso e Ocupação do Solo da área da bacia em estudo, Ralph Stettinger. Fonte: (TORRES *et al.*, 2006).**

A bacia hidrográfica em estudo, Ralph Stettinger, situa-se na macrozona 4, definida como área de urbanização consolidada, abrangendo parte das áreas de planejamento 21, 22 e 24. A macrozona 4 compreende a região mais adensada do município e caracteriza-se por abranger toda a área central e bairros predominantemente de classe média e alta, concentrando o maior número de atividades urbanas do município.

Para a bacia em questão, Ralph Stettinger, são apresentadas na Tabela 4.1, a divisão físico-territorial de Planejamento que relaciona a macrozona 4 com suas áreas de planejamento,

apresentando a porcentagem de cada Zona que compõem as UTB's; e na Tabela 4.2, em seguida, as áreas das UTB's para a bacia hidrográfica em estudo.

**Tabela 4.1: Divisão físico territorial de Planejamento da bacia hidrográfica em estudo, Ralph Stettinger: Macrozona / Área de Planejamento/ UTB's/Zona. Fonte: (SEPLAMA, 2007).**

Macrozona	Área de Planejamento		Unidade Territorial Básica		Porcentagem aproximada de cada Zona presente na APs
	Nº	Nome	Nº	Nome	
4	21	Centro/ Cambuí Bosque/Guanabara	30	Guanabara	Z17 (35%)
			31	Cambuí	Z6 e Z7 (30%)
			34	Centro	Z9, Z10 e Z13 (20%)
			35	Bosque	Z18 (3%)
	22	Vila Brandina Nova Campinas Bairro das Palmeiras Parque Ecológico	33	Vila Brandina	Z3 e Z4
			36	Nova Campinas	
			37	Parque Ecológico	
			38A	Bairro das Palmeiras	
	24	Ponte Preta Proença São Fernando/ Vila Orozimbo Maia Jardim das Oliveiras/ Swift	56	Ponte Preta	Z5 (5%)
			57	Jardim Proença	Z6 (3%)
			58	São Fernando/ Vl. Orozimbo Maia	Z3 (65%)
			61	Jd. das Oliveiras/ Swift	Z9 (9%)

**Tabela 4.2: Áreas das UTB's da bacia hidrográfica em estudo, Ralph Stettinger. Fonte: (VICENTINI, 2000).**

Bacia em estudo – Ralph Stettinger	
UTB	Área (km <sup>2</sup> )
31	0,17
35	0,64
36	0,92
37	0,57
56	0,33
57	2,38
58	1,97
61	0,61
<b>Total</b>	<b>7,59</b>

### **4.1.3 Estações de Monitoramento**

#### ***4.1.3.1 Monitoramento pluviográfico e fluviográfico***

Para alcançar o objetivo proposto, foi instrumentada uma bacia experimental para a obtenção sistemática de dados de precipitação, vazão e das características físicas da bacia. Foi realizado um estudo comparativo dos hidrogramas de cheias calculados com os hidrogramas observados. O método utilizado para a obtenção do hidrograma de cheia foi mediante o uso do modelo hidrológico SWMM, que simula a geração e propagação do escoamento superficial da bacia e a propagação do fluxo em condutos e canais.

Deste modo, para alimentação do modelo hidrológico, foram utilizados dados de precipitação provenientes de estações pluviográficas que apresentam boa representatividade pontual e do radar meteorológico de São Paulo (cedidos pelo Professor Dr. Augusto José Pereira Filho do IAG / USP), que tem a vantagem de conseguir representar a variável hidrológica no espaço.

Assim, para realização deste estudo, a metodologia foi aplicada em uma bacia hidrográfica urbana no município de Campinas. A bacia selecionada foi a porção de montante da bacia do Ribeirão das Anhumas, denominada bacia Ralph Stettinger, com área de 7,59 Km<sup>2</sup>. Esta bacia apresenta elevado grau de impermeabilização, abrangendo inclusive a região central da cidade, além de possuir diferentes tipos de uso de solo como loteamentos populares, áreas comerciais, loteamentos e/ou condomínios de alto padrão e áreas ainda não parceladas, mas com alto potencial de ocupação.

Para a realização do monitoramento da bacia estudada, Ralph Stettinger, pertencente à bacia hidrográfica do Ribeirão das Anhumas foram instaladas cinco estações de monitoramento, uma estação fluviográfica e quatro estações pluviográficas, para a coleta de dados de níveis nos trechos de medição e chuvas com registro diário, respectivamente. Os quatro pluviógrafos foram instalados em pontos adequadamente escolhidos de forma a permitir o estudo da distribuição das precipitações na bacia em estudo. Além disso, foram utilizados dados do radar meteorológico de São Paulo, instalado junto à barragem de Ponte Nova, no município de Biritiba-Mirim, que cobrem a região da bacia do Ribeirão das Anhumas.

O limnógrafo localiza-se no posto da “Praça Ralph Stettinger” à Avenida José de Souza Campos, na coordenada 47°02’48’’ de longitude oeste e 22°54’10,7’’ de latitude sul.

O primeiro pluviógrafo localiza-se no posto do Jardim Paranapanema em um almoxarifado da Sanasa à Rua Raul Ferrari, na coordenada 47°01’35’’ de longitude oeste e 22°54’37,7’’ de latitude sul; o segundo pluviógrafo localiza-se na ETA I e II à Rua Abolição nº 2375, na coordenada 47°02’19,1’’ de longitude oeste e 22°55’41,6’’ de latitude sul; o terceiro pluviógrafo localiza-se no posto da Sede da Sanasa à Avenida da Saudade nº 500, na coordenada 47°03’15,2’’ de longitude oeste e 22°55’06,9’’ de latitude sul; o quarto pluviógrafo localiza-se na CBPO à Avenida José de Souza Campos nº 1600, na coordenada 47°02’46,9’’ de longitude oeste e 22°53’29,4’’ de latitude sul.

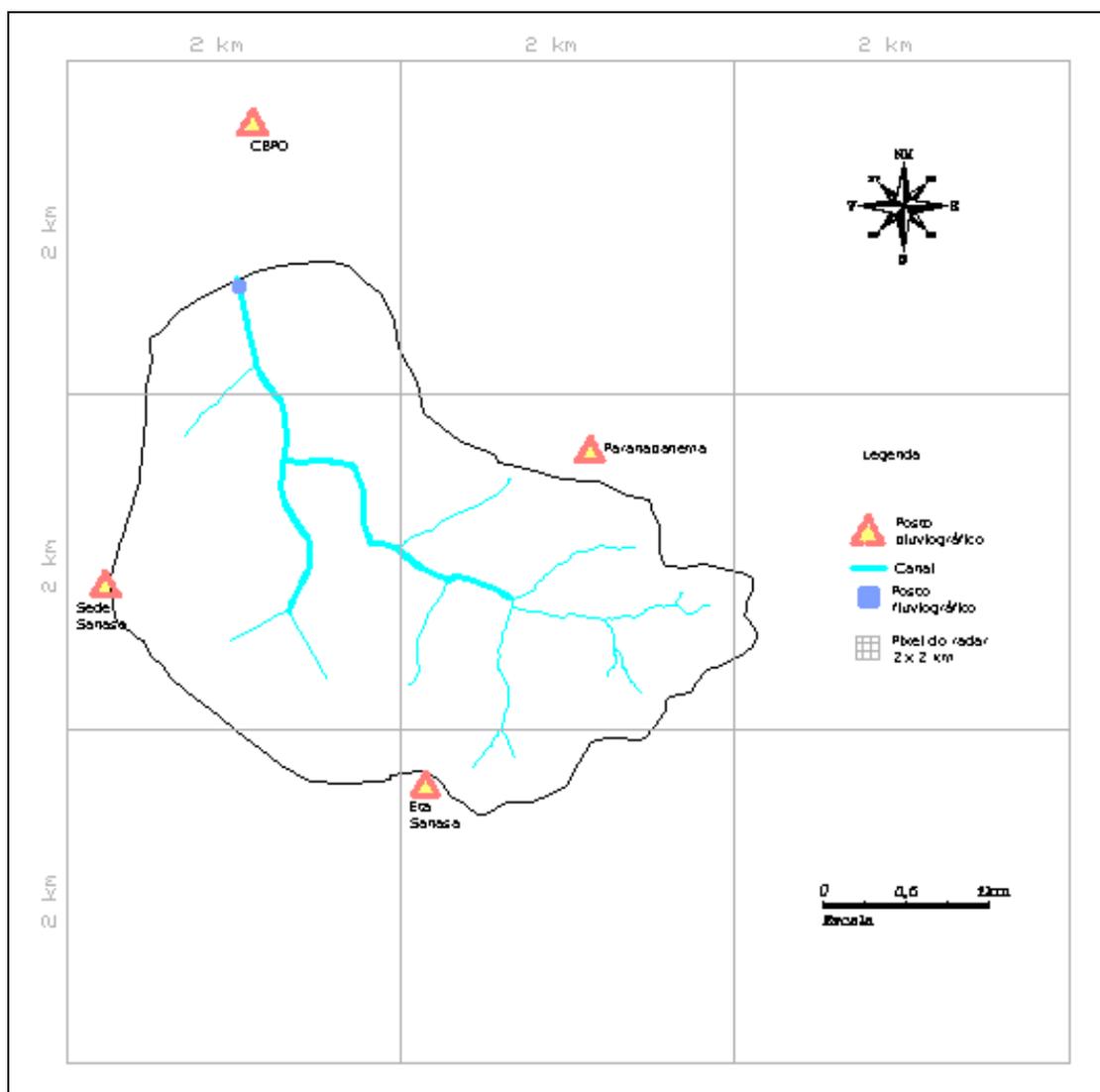
Os dados dos pluviógrafos foram selecionados de acordo com os registros do limnógrafo, para os períodos em que apresentaram grandes valores de deflúvio. A partir disto, foram obtidas as precipitações que deram origem às respectivas cheias registradas pelos pluviógrafos localizados na bacia do Ribeirão das Anhumas e pelo radar meteorológico que cobre a área. Depois de selecionados os registros de chuva, estes são totalizados a cada 10 minutos para a montagem dos hietogramas de cada evento em cada posto pluviográfico.

Existem diversos métodos na literatura para compor o hietograma médio resultante da bacia. Neste trabalho foi aplicado o método de Thiessen para compor o hietograma médio resultante da bacia em estudo, Ralph Stettinger. Utilizando o mapa da bacia em estudo, com a localização dos postos pluviográficos, foi determinada a área de influência de cada posto. Para a aplicação do método foi empregado o *Software* Autocad 2005.

Os postos pluviográficos considerados no cálculo da chuva média utilizando o método de Thiessen e seus respectivos pesos, que representam a área de influência de cada posto, estão listados na Tabela 4.3. A Figura 4.5 mostra a localização dos quatro postos pluviográficos, do posto pluviográfico e o gride do radar meteorológico, com pixel de resolução 2 x 2 km, na bacia hidrográfica Ralph Stettinger.

**Tabela 4.3: Postos pluviográficos utilizados para o cálculo da chuva média na bacia em estudo, Ralph Stettinger.**

NOME	CÓDIGO (UNICAMP)	MUNICÍPIO	LATITUDE	LONGITUDE	ÁREA DE INFLUÊNCIA DO MÉTODO DE THIESSEN
Paranapanema	101	Campinas	22° 54' 37,7"	47° 01' 35"	0,33
ETA	103	Campinas	22° 55' 41,6"	47° 02' 19,1"	0,30
Sanasa	104	Campinas	22° 55' 06,9"	47° 03' 15,2"	0,27
CBPO	105	Campinas	22° 53' 29,4"	47° 02' 46,9"	0,10



**Figura 4.5: Localização dos postos pluviográficos e fluvigráfico e gride do radar na Bacia Hidrográfica Ralph Stettinger.**

Os limnigramas selecionados, empregando a curva chave, foram transformados em hidrogramas. Posteriormente foram utilizados para a escolha dos eventos de chuva.

Foi utilizado o intervalo de simulação de 10 minutos para discretização dos dados de chuva e, em média, de aproximadamente duas horas o tempo total simulado. Isto se deve ao fato da bacia em estudo possuir dimensões pequenas e, também, porque os eventos são relativamente curtos, ou seja, tanto a precipitação como a vazão produzem respostas rápidas.

Para aquisição de dados de precipitação por pluviógrafos digitais, compreendido no período de 2005 a 2007, foram utilizados os Sensores de Chuva da Campbell SC, que é constituído por um Pluviógrafo digital, o qual converte a informação obtida em mm e as armazena em um *data logger* (memória).

#### **4.1.3.2 Radar Meteorológico de São Paulo**

O radar meteorológico de São Paulo é de propriedade do Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE) autarquia da Secretaria de Recursos Hídricos, Saneamento e Obras do estado de São Paulo. O radar foi fabricado pela McGill University do Canadá e está instalado na Barragem de Ponte Nova, localizada na cabeceira do rio Tietê, no município de Biritiba Mirim, SP. O radar foi instalado no Marco Gegran nas seguintes coordenadas:

- latitude:  $x = 400,80 \text{ km}$  ( $23^\circ 36' 00'' \text{ S}$ )
- longitude:  $y = 7.389,70 \text{ km}$  ( $45^\circ 58' 20'' \text{ W}$ )
- altitude:  $z = 916 \text{ metros}$  (DATUM IGG)

O radar de São Paulo é do tipo banda S (comprimento de onda = 10 cm) e gera uma série de produtos, tais como: mapas de precipitação (CAPPI), altitude máxima dos sistemas precipitantes (ECHOTOP), corte vertical dos sistemas precipitantes, entre outros.

#### **4.1.3.3 Características técnicas e aplicação do radar meteorológico de São Paulo**

O equipamento do radar é formado por vários componentes, tais como: antena (refletor), redoma, pedestal, transmissor, receptor, vídeo digitalizador e sistema processador.

O radar meteorológico de São Paulo, com resolução espacial de  $2 \times 2 \text{ km}$  ( $4 \text{ Km}^2$ ) e temporal de 5 minutos, cobre uma área de  $129.600 \text{ km}^2$  abrangendo o litoral paulista desde Iguape até Angra dos Reis, no Rio de Janeiro, e seus limites atingindo Miracatu, Sorocaba, Porto Feliz, Mogi-Guaçu, sul de Minas Gerais e o Vale do Paraíba, passando a divisa do Rio de Janeiro.

A cada varredura de 360 graus, realizada em cinco minutos, o radar meteorológico de São Paulo fornece três informações básicas: onde está chovendo, a intensidade da precipitação e o sentido e deslocamento das massas de nuvens.

Uma característica importante dos radares meteorológicos modernos é o *Software* para tratamento do grande volume de dados de refletividade gerados. Esse *software* permite ter-se em tempo real o mapa de chuva a um nível de altura constante, denominado CAPPI. Os dados de chuva na área do radar são interpolados num nível de altura constante entre 1,5 a 18,0 km de altura, numa área de  $360 \times 360 \text{ km}$ , com uma resolução de  $2 \times 2 \text{ km}$ . O CAPPI é obtido da seguinte forma: após a varredura completa do radar em todas as elevações da antena, seleciona-se a altitude desejada dentre as possíveis. Em seguida, o programa interpola as informações contidas em cada uma das elevações, conhecidas como PPI (*Plan Position Indicator*), formando assim o campo em um plano de altitude constante (PEREIRA FILHO, 1989).

Como já visto no capítulo número 3, existem diversas possibilidades de estimar precipitação a partir do espaço. Dessa forma, o dado escolhido para avaliação no contexto de simulação hidrológica chuva-vazão foi o Radar Meteorológico de São Paulo ao invés de imagens de satélites, por várias razões. Em primeiro lugar, suas resoluções espacial de  $2 \times 2 \text{ km}$  e temporal de 5 minutos serem apropriadas para a área em estudo. Em segundo lugar, porque as informações obtidas pelos pluviógrafos possuem resolução temporal de 10 minutos. Assim, conseqüentemente, os dados integrados de radar e pluviógrafo terão maior acuracidade do que se fossem integrados dados de satélites com pluviógrafos, pois a resolução temporal do satélite não incluiria as nuvens precipitáveis entre o intervalo de tempo observado.

Para a estimativa da precipitação com informações de radar foram utilizadas informações de refletividade na forma de matrizes de CAPPI (Indicador de Posição no Plano a Altitude Constante) a altitude de 3 km e resolução de  $2 \times 2 \text{ km}$ . Estes dados foram convertidos para taxas de precipitação ( $R \text{ [mm h}^{-1}\text{]}$ ) utilizando-se a relação ZR de Marshall e Palmer (1948), a equação (3.2).

Para seleção dos eventos foi analisado o período compreendido entre os anos de 2005 a 2007, sendo selecionados eventos representando cheias com maiores magnitudes com base na altura limnimétrica do posto fluviométrico instalado na Praça Ralph Stettinger.

## **4.2 MÉTODOS**

### **4.2.1 Análise do campo de precipitação**

O estudo da distribuição espacial da chuva pode ser feito através da composição de campos de precipitação ou pela determinação da precipitação média. Os campos de precipitação podem ser compostos a partir de métodos de interpolação de dados pluviométricos que fornece a chuva média. A análise é feita comparando os valores pontuais ou de médias espaciais. Nesses estudos é comum admitir-se como padrão de comparação a precipitação média calculada com a rede mais densa, uma vez que a distribuição real é desconhecida. A comparação dos resultados obtidos por diversos autores não é consistente, pois não existe uma padronização na representação da variação espacial dos eventos de chuva (SILVERMAN *et al.*, 1981).

Para composição de campos de precipitação, tem-se observado o interesse em combinar informações adquiridas via radar aos dados medidos por postos pluviométricos. As técnicas que do conjunto relacionam as medidas de radar com as de pluviômetros e propõem fatores de ajuste, que geralmente consideram as distâncias relativas entre os instrumentos de medida, o tipo de precipitação e o coeficiente G (razão entre a medida pontual pluviométrica e do radar = P/R). Nesses trabalhos, os pluviômetros são usados para ajustar dados de radar. A verificação é feita por meio de análises de dados pontuais e médias espaciais.

As técnicas de interpolação empregadas na composição de campos de precipitação são classificadas em métodos simples e determinísticos, onde os mais conhecidos são: vizinho mais próximo, inverso da distância, inverso do quadrado da distância e ponderações por quadrantes. Nesse tipo de análise, a estimativa de chuva num ponto nunca será maior nem menor que os valores extremos observados. Além disso, todos os pontos terão valores de chuva, o que pode não corresponder a realidade. Nos métodos mais sofisticados estão os determinísticos, que consistem em interpolações polinomiais para traçado de isoietas e os estatísticos, que usam estimadores tais como Kriging, entre outros (CREUTIN e OBLED, 1982).

## **4.2.2 Análise do sistema de drenagem da bacia**

Uma das características da superfície terrestre é sua heterogeneidade, sendo esta ainda mais diversificada quando se refere às áreas urbanas, em consequência de interferências de ações antrópicas. A subdivisão da bacia em áreas menores que possuam características semelhantes é uma das maneiras de tentar representar, da forma mais real, sua variação espacial e os parâmetros relacionados com os processos físicos e hidrológicos.

A discretização da bacia hidrográfica em estudo baseou-se em três regras: homogeneidade das sub-bacias, situação do sistema de drenagem real e a estabilidade numérica do modelo SWMM. Para a discretização da bacia em áreas menores foram determinados dois níveis de discretização. Esses níveis foram determinados com base nas características físicas e de uso e ocupação do solo da bacia, apresentados nos itens anteriores.

A discretização do sistema de drenagem foi realizada a partir dos dados cedidos pela SANASA (Sociedade de Abastecimento de Água e Saneamento S.A.) dos levantamentos topográficos realizados para o canal e para as áreas de inundação. Um fator limitante e de fundamental importância na simulação é a estabilidade numérica do modelo, sendo que esta foi verificada para cada esquema de condutos e canais propostos para representação do sistema de drenagem.

### ***4.2.2.1 Discretização das sub-bacias***

As discretizações efetuadas, para a bacia em estudo, buscaram a subdivisão da área em sub-bacias homogêneas; para isso foram utilizadas as características físicas, obtidas nos mapas aerofotogramétricos, planialtimétrico, pedológico, as informações sobre os sistemas de drenagem existentes e análise do uso e ocupação do solo. Destas análises foram propostos dois níveis de discretização, o primeiro com um maior nível de subdivisão, sendo denominado de discretização detalhada e o segundo com menor nível de subdivisão, sendo denominado de discretização simplificada.

Na definição da largura das sub-bacias (W), foi adotado o valor da largura do retângulo equivalente apresentado por Villela e Matos (1975) para a representação deste parâmetro, visto na equação (4.1), na qual, o coeficiente de compacidade é obtido pela equação (4.2).

$$W = \frac{k_c \sqrt{A}}{1,12} \left[ 1 - \sqrt{1 - \left( \frac{1,128}{k_c} \right)^2} \right] \quad (4.1)$$

$$k_c = 0,282 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (4.2)$$

Na qual:

W = largura da sub-bacia (m)

$k_c$  = coeficiente de compacidade;

A = área da bacia hidrográfica ou sub-bacia (m<sup>2</sup>);

P = perímetro da bacia hidrográfica ou sub-bacia (m).

#### 4.2.3 Aplicação do modelo SWMM

A crescente capacidade do homem de modificar o ambiente tem exigido o desenvolvimento de modelos que representem mais realisticamente os processos hidrológicos, para que seja possível avaliar os impactos introduzidos por estas alterações. Para tanto, os modelos devem representar de forma distribuída os eventos de precipitação, evaporação e as características físicas da bacia em processo de modificação.

Dessa forma, o modelo IPH II não foi escolhido para ser empregado neste trabalho, em virtude de ser um modelo concentrado, pois o modelo não permite a discretização da bacia por meio de sub-bacias; também porque o modelo IPH II é aplicado em bacias que não necessitam de propagação no leito do rio ou que este efeito não seja importante no processo, uma vez que simula somente o escoamento na superfície da bacia e porque não faz a propagação em galerias. Assim, o modelo em questão não atende ao objetivo que é discretizar a bacia utilizando as características físicas da mesma.

Apesar do modelo HEC-HMS atender aos objetivos deste trabalho, ele não foi o escolhido para ser utilizado. Este modelo exige um número muito grande de dados para ser

aplicado. O modelo HEC-HMS usa o modelo hidráulico de escoamento HEC-RAS, o qual exige um número muito grande de levantamentos topográficos de várias seções transversais da calha do rio, as quais nem sempre estão disponíveis.

A necessidade crescente de conhecer o comportamento hidrológico das bacias hidrográficas, por meio de bacias experimentais e independentes da multiplicidade de abordagens e modelos existentes, tem sido um tema abordado nas diferentes formas de conhecimento disponível. Entretanto, ainda permanece um assunto amplo e complexo, com disponibilidade de dados escassa, especialmente na região tropical, particularmente nas bacias urbanas. Tais fatos incentivaram a proposição da abordagem de conhecimento da dinâmica do comportamento hidrológico de uma bacia urbana com a utilização de um dos modelos mais difundidos na atualidade, o SWMM. O modelo SWMM permite dividir em trechos os canais da bacia, possibilitando considerar canais abertos, fechados ou com outras diferentes características (declividades, formas, dimensões, etc).

O modelo SWMM foi aplicado para a bacia em estudo mediante utilização dos blocos *Runoff* e *Extran* para a simulação do escoamento superficial e a propagação no canal principal, respectivamente. O grau de discretização utilizado para as simulações foi detalhado no item 4.2.2.

#### **4.2.3.1 Representação do sistema de drenagem no modelo SWMM**

O sistema de drenagem foi representado pelos nós, vínculos existentes entre eles e estruturas especiais, como orifícios e vertedores. Os nós foram os primeiros elementos a serem inseridos e representam a ligação entre os vínculos e ou as estruturas especiais. Os nós necessitam de informações como: posicionamento, coordenadas (x, y), cotas do terreno e de fundo.

Os vínculos representam os canais abertos ou fechados, sendo necessário adicionar as seguintes informações:

- diâmetro dos condutos,
- dimensões dos canais prismáticos;
- para as seções irregulares os valores da altura e comprimento de cada ponto da seção;
- os nós aos quais estão conectados;
- coeficiente de rugosidade de *Manning*;

- comprimento do canal ou conduto;
- cotas de montante e jusante.

As sub-bacias, que representam as áreas homogêneas de contribuição, são inseridas aos nós. É exatamente neste momento que se dá a interface entre o bloco *Extran* e o bloco *Runoff*. Consequentemente, a necessidade de informação dos dados de entrada das sub-bacias, sendo eles: a área de contribuição, a largura representativa, a declividade, a porcentagem de área impermeável, a altura de armazenamento, o coeficiente de rugosidade de *Manning* e os parâmetros de infiltração  $I_0$ ,  $I_b$  e  $k$ , da equação de Horton, escolhida neste estudo para representar esse processo. Conforme já citado no item 3.6.3, a infiltração das áreas permeáveis, no modelo SWMM, podem ser calculadas pelas equações de Horton, Green-Ampt ou *Curve Number CN*. Neste estudo foi utilizado o modelo de Horton, sendo que esta escolha foi feita por apresentar o melhor ajuste no processo de calibração. Os valores adotados para os parâmetros foram os recomendados pelos autores do modelo, de acordo com o tipo de solo da área estudada.

Após todo o sistema ter sido implantado, foi analisado o passo de tempo necessário para que não ocorra a instabilidade numérica.

#### **4.2.3.2 Estabilidade do modelo**

As equações diferenciais que regem o escoamento unidimensional não permanente gradualmente variado em canais, denominadas de equações de Saint Venant, são não-lineares ou quase lineares já que os coeficientes dos termos diferenciais dependem das variáveis dependentes. Ao resolver estas equações por esquemas implícitos de diferenças finitas, as equações numéricas resultam também em equações não-lineares.

A estabilidade dos esquemas numéricos está relacionada com erro de arredondamento. Segundo Tucci (1998), não existe metodologia para determinar as condições de estabilidade para a equação diferencial não-linear. A condição de estabilidade para um esquema explícito, condição de Courant, é obtida por meio de uma versão linear das equações diferenciais do escoamento. Como as equações diferenciais são consideradas quase-lineares, a análise da estabilidade com base em equações linearizadas está próxima da realidade.

Maiores detalhes sobre a estabilidade no bloco *EXTRAN* do modelo SWMM são apresentados no item A.3.

#### 4.2.4 Calibração do modelo SWMM

A calibração do modelo para a área em estudo pertencente à bacia hidrográfica do Ribeirão das Anhumas foi realizada para cinco eventos ocorridos entre 2005 e 2007.

Os eventos foram calibrados individualmente tentando obter-se o melhor ajuste individual dos eventos monitorados; isto resultou em conjuntos de parâmetros específicos para cada evento. Depois foi escolhido um único conjunto de parâmetros que pudesse representar da melhor maneira possível todos os eventos já calibrados. Para calibração foram utilizados dados de precipitação medidos por pluviógrafos e vazão observada. Em seguida buscou-se a validação do modelo comparando-se os dados de vazão observadas, não utilizados na calibração, com os resultados simulados, usando dados de precipitação obtidos por pluviógrafo e radar meteorológico.

Não foi utilizado algoritmo de otimização na calibração dos eventos. O critério de calibração por tentativa e erro permite o aprofundamento no entendimento do funcionamento do modelo, mas tem o ônus de ser um processo demorado e subjetivo. Por outro lado, a calibração automática apresenta a vantagem da rapidez e eliminação da subjetividade no processo, porém é necessário analisar os limites dos parâmetros e discuti-los. Para avaliação e calibração do modelo hidrológico foram utilizados o coeficiente de correlação linear ( $R$ ), o coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe ( $E$ ) e a comparação entre volume escoado e vazão de pico. O coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe (1970) foi descrito por Weglarczyk (1998) e tem seu equacionamento definido como mostra a equação (4.3), na qual os coeficientes desta apresentam-se nas equações (4.4, 4.5 e 4.6). A equação (4.3) reflete melhor as características desejáveis e indesejáveis do modelo avaliado e de seus aumentos de valor com qualidade crescente do modelo.

$$E = R^2 - C^2 - B^2 \quad (4.3)$$

Sendo:

$$R^2 = \left( \frac{\text{cov}(Q_o, Q_c)}{S_o S_c} \right)^2 = \left( \frac{\overline{Q_o Q_c} - m_o m_c}{S_o S_c} \right)^2 \quad (4.4)$$

$$C^2 = \left( \frac{S_c}{S_o} - R \right)^2 \quad (4.5)$$

$$B^2 = \left( \frac{B^2}{S_o^2} \right)^2 = \left( \frac{(m_c - m_o)^2}{S_o^2} \right)^2 \quad (4.6)$$

Na qual:

$\text{cov}(Q_o, Q_c)$  = covariância da vazão observada e a vazão calculada;

$S_o$  e  $S_c$  = desvio padrão da vazão observada e calculada, respectivamente;

$Q_o$  e  $Q_c$  = vazão observada e calculada respectivamente;

$m_o$  e  $m_c$  = média da vazão observada e calculada, respectivamente;

$B$  = diferença entre as vazões média calculada e observada.

O bloco *Runoff*, responsável pela transformação chuva-vazão e a propagação do escoamento nas sub-bacias, possui 11 parâmetros. Sendo 3 deles, área (A), declividade (S) e a largura de escoamento da sub-bacia (W), determinados diretamente pelas características físicas da bacia. Os demais parâmetros são: porcentagem de áreas impermeáveis (AI), altura de armazenamento das áreas permeáveis ( $d_p$ ) e impermeáveis ( $d_i$ ), coeficiente de rugosidade de *Manning* das áreas permeáveis ( $n_p$ ) e impermeáveis ( $n_i$ ) e os parâmetros de infiltração de Horton ( $I_o$ ,  $I_b$  e  $k$ ).

A metodologia de calibração baseou-se no ajuste dos parâmetros por meio de um processo manual, por tentativa e erro. Os parâmetros que não dependem dos valores obtidos na caracterização da bacia tiveram seu valor inicial adotado segundo os valores propostos pelo manual do usuário do modelo SWMM (JAMES *et al.*, 2003).

A calibração foi validada comparando-se os hidrogramas gerados pelo modelo chuva-vazão utilizando a distribuição espacial da precipitação, a qual foi obtida empregando primeiramente os dados medidos por pluviógrafos e em seguida usando dados estimados por radar meteorológico. Estes resultados foram comparados com os hidrogramas observados.

#### 4.2.5 Análise de sensibilidade dos parâmetros do modelo SWMM

A análise de sensibilidade dos parâmetros mais importantes, dos módulos *Runoff* e *Extran*, foi realizada com o objetivo de entender a influência dos parâmetros nas variáveis de saída do modelo. As variáveis dependentes utilizadas na análise foram: a vazão de pico, o volume escoado e o tempo de pico da onda de cheia.

Para esta análise foi selecionado o evento do dia 28/01/06, com uma precipitação acumulada de 12,86 mm, para bacia com discretização detalhada. Este evento de chuva foi escolhido devido ao bom ajuste obtido na calibração dos parâmetros.

A análise ocorreu para a bacia com discretização detalhada em 6 sub-bacias e 21 trechos do canal buscando a melhor representatividade para a bacia hidrográfica. A análise foi realizada variando um parâmetro por vez, deixando os demais fixos, atribuindo-se a mesma variação do parâmetro, em análise, em todas as sub-bacias ou trechos do canal. Foram empregados, como valor base de cada parâmetro, os valores obtidos no ajuste do modelo aos dados observados em campo para o evento em questão.

Os parâmetros analisados referentes ao módulo *Runoff* foram: largura das sub-bacias ( $W$ ), porcentagem de áreas impermeáveis ( $AI$ ), coeficiente de rugosidade de *Manning* nas sub-bacias ( $n$ ), capacidade de infiltração ( $I$ ).

Para o módulo *Extran* foi analisado o parâmetro que representa o coeficiente de rugosidade de *Manning* no canal.



## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

---

### 5.1 CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DA BACIA EM ESTUDO

As características físicas da bacia foram determinadas a partir das cartas topográficas aerofotogramétricas do município de Campinas, digitalizadas na escala 1:10000, referenciadas pela projeção UTM (*Universal Transverse Mercator*), Datum horizontal Córrego Alegre-MG e Datum vertical Imbituba-SC, cedidas pela Biblioteca do Instituto de Geociências da UNICAMP.

O posto fluviométrico localizado na Praça Ralph Stettinger escoia uma área de contribuição de 7,59 Km<sup>2</sup>, abrangendo parte das áreas de planejamento 21, 22 e 24, pertencentes à macrozona 4, definida como área de urbanização consolidada. A área da bacia em estudo apresenta índice de conformação de 0,33 e índice de compacidade de 1,19. O índice de compacidade é a relação entre o perímetro da bacia e a circunferência de um círculo de área igual à da bacia. A tendência à enchente de uma bacia será tanto maior quanto mais próximo da unidade for este coeficiente. Um coeficiente igual à unidade corresponderia a uma bacia circular.

**Tabela 5.1: Características físicas da bacia hidrográfica em estudo, Ralph Stettinger. (VICENTINI, 2000).**

<b>Parâmetro</b>	<b>Bacia</b>	<b>Unidade</b>
Área	7,59	km <sup>2</sup>
Perímetro	11693	m
Coeficiente de compacidade	1,19	
Fator de forma	0,33	
Elevação máxima	761	m
Elevação mínima	645	m
Comprimento total do rio principal	4210	m
Declividade do rio principal	0,0039	m/m
Declividade média da bacia	0,083	m/m

## **5.2 DADOS DE PRECIPITAÇÃO**

### **5.2.1 Seleção dos dados de precipitação e hietograma médio da bacia Ralph Stettinger**

Os eventos foram selecionados de acordo com a disponibilidade conjunta dos dados de precipitação medidos pelos pluviógrafos e estimados pelo radar meteorológico e de vazão observada. Foram escolhidas as chuvas que apresentaram os maiores picos de vazão. Assim sendo, foram selecionados nove eventos: 20/06/05, 24/01/06, 28/01/06, 21/02/06, 04/03/06, 01/11/06, 26/12/06, 27/12/06, 12/01/07, cujos dados de precipitação que foram obtidos por meio de pluviógrafos e por radar meteorológico, podem ser visualizados nas Tabelas C.1 a C.9, no Anexo C e nas Tabelas D.1 a D.9, no Anexo D, respectivamente.

Para compor o hietograma médio resultante da bacia em estudo, Ralph Stettinger, foi aplicado o método de Thiessen, utilizando o mapa da bacia em estudo. Com a localização dos postos pluviográficos foi determinada a área de influência de cada posto. Quando não havia registro de dados de precipitação em algum posto a área de influência de cada posto era recalculada.

O cálculo da chuva média de Thiessen foi empregado nos dados de pluviógrafos e também com os dados de radar meteorológico, como dado de entrada no modelo SWMM, tanto para bacia detalhada (6 sub-bacias) quanto para bacia simplificada (bacia única).

Para os dados de radar foi extraído de cada quadrícula (2 x 2 Km), da matriz 240 x 240 (da área total de abrangência do radar), a taxa de precipitação estimada pelo radar meteorológico correspondentes a localização dos quatro postos pluviográficos, isto é, as alturas pluviométricas estimadas por radar meteorológico correspondentes a cada posto são multiplicadas pela proporção de sua área geométrica de influência.

Dessa forma, obteve-se a estimativa de precipitação equivalente para a área pertencente aos quatro postos, sendo possível aplicar a mesma metodologia empregada aos dados de pluviógrafos para os dados de radar meteorológico, empregando para o cálculo da chuva média o método de Thiessen.

## 5.2.2 Análise dos dados de precipitação

A precipitação acumulada estimada pelo radar meteorológico, para cada um dos nove eventos, foi comparada com os valores medidos no pluviógrafos. As estimativas do radar meteorológico resultaram cerca de 28% em média abaixo dos valores medidos pelas estações pluviográficas, com um desvio padrão de 8,3 e com coeficiente de variação de 0,35. Esse resultado pode ter sido decorrentes dos efeitos da distância do radar, ecos de terreno, propagação anômala e o uso da relação clássica de Marshall e Palmer (1948), a equação (3.2).

Para os nove eventos, os totais acumulados de precipitação medidos nos quatro pluviógrafos atingiram 207,30 mm e os totais acumulados estimados pelo radar meteorológico atingiram 165,38 mm, subestimando em torno de 28% a precipitação total média estimada pelo radar meteorológico.

Para cada um dos nove eventos, o total precipitado na bacia medido pelos pluviógrafos e o total precipitado estimado pelo radar meteorológico, bem como o percentual em que a precipitação medida pelo radar meteorológico subestimou a chuva medida pelos pluviógrafos, estão apresentados na Tabela 5.2. Podem ser visualizados nas Figuras 5.1 a 5.9 hietogramas comparando os dados de precipitação medidos por pluviógrafos com dados de precipitação estimados pelo radar meteorológico para os nove eventos.

**Tabela 5.2: Comparação do total médio acumulado de precipitação medido pelos pluviógrafos e estimado pelo radar meteorológico.**

Evento	Total médio acumulado de Precipitação (mm)		% de precipitação subestimada pelo radar meteorológico
	Medido por Pluviógrafos	Medido por radar meteorológico	
20/05/2005	26,34	18,55	42,03
24/01/2006	15,44	12,67	21,83
28/01/2006	12,86	8,49	51,59
21/02/2006	13,80	10,72	28,74
04/03/2006	34,69	31,36	10,63
01/11/2006	27,82	19,64	41,73
26/12/2006	26,57	22,32	19,04
27/12/2006	16,26	13,65	19,15
12/01/2007	33,50	28,00	19,67

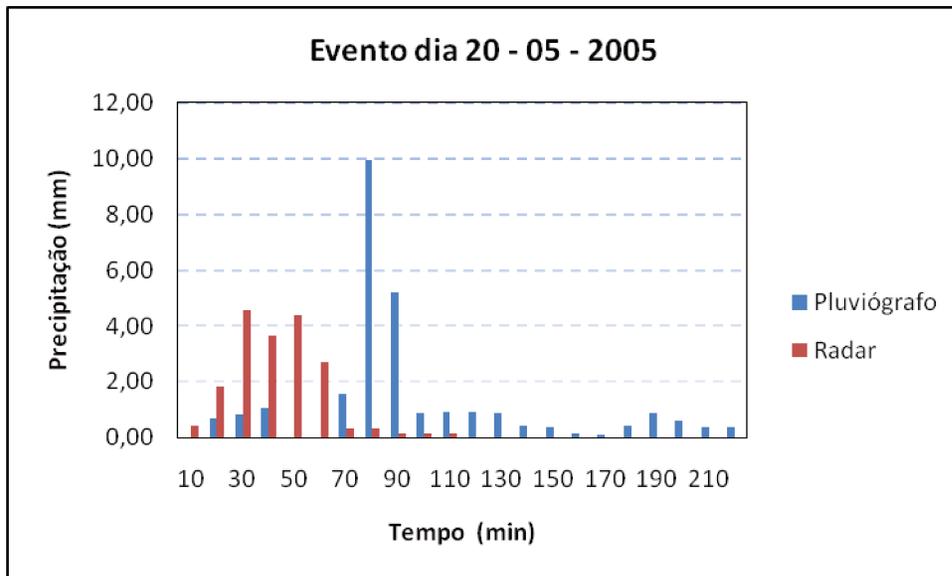


Figura 5.1: Hietograma comparando a precipitação medida por pluviógrafos com a estimada por radar meteorológico.

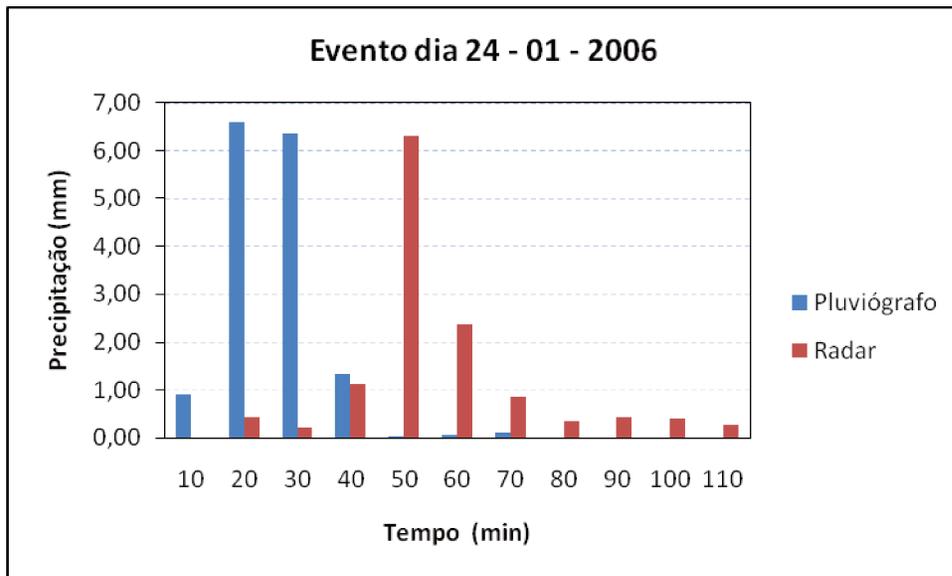
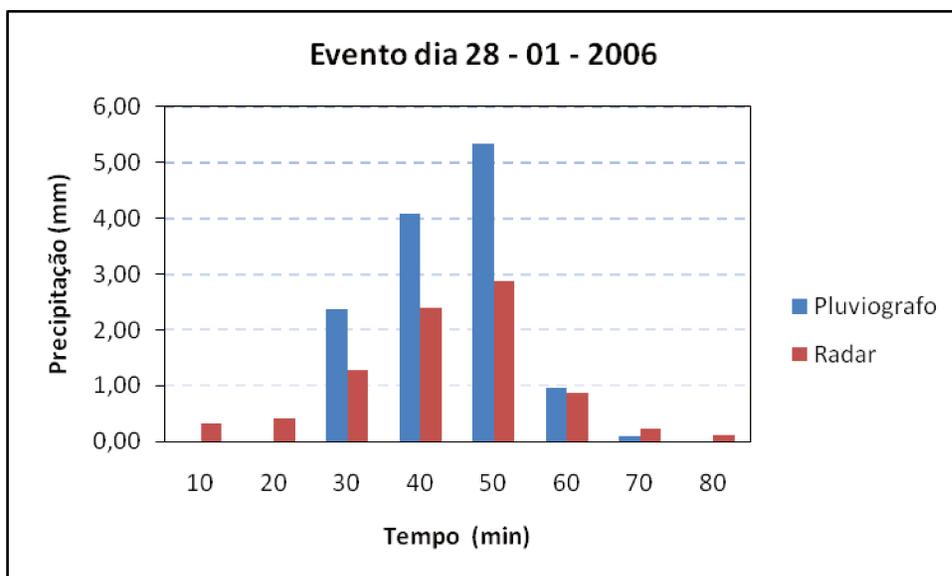
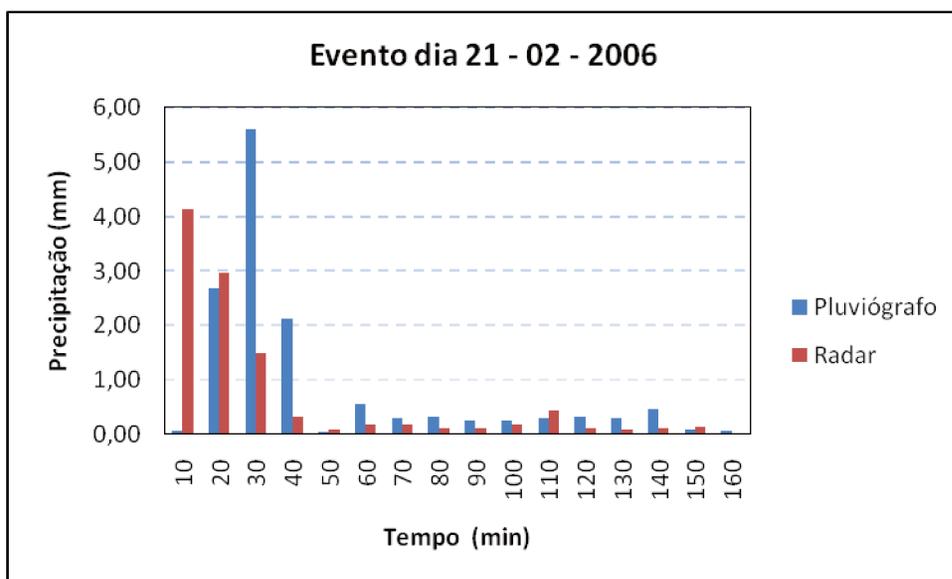


Figura 5.2: Hietograma comparando a precipitação medida por pluviógrafos com a estimada por radar meteorológico.



**Figura 5.3:** Hietograma comparando a precipitação medida por pluviógrafos com a estimada por radar meteorológico.



**Figura 5.4:** Hietograma comparando a precipitação medida por pluviógrafos com a estimada por radar meteorológico.

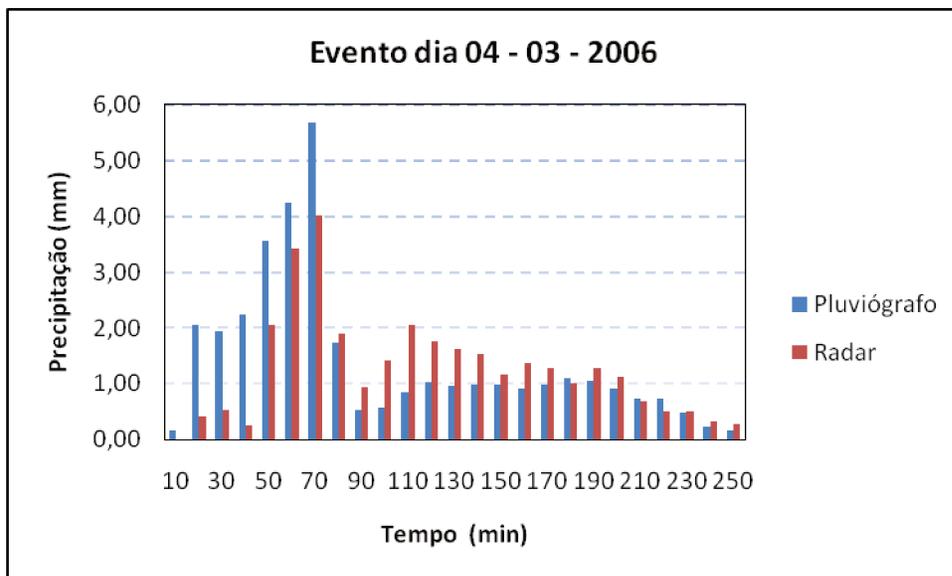


Figura 5.5: Hietograma comparando a precipitação medida por pluviógrafos com a estimada por radar meteorológico.

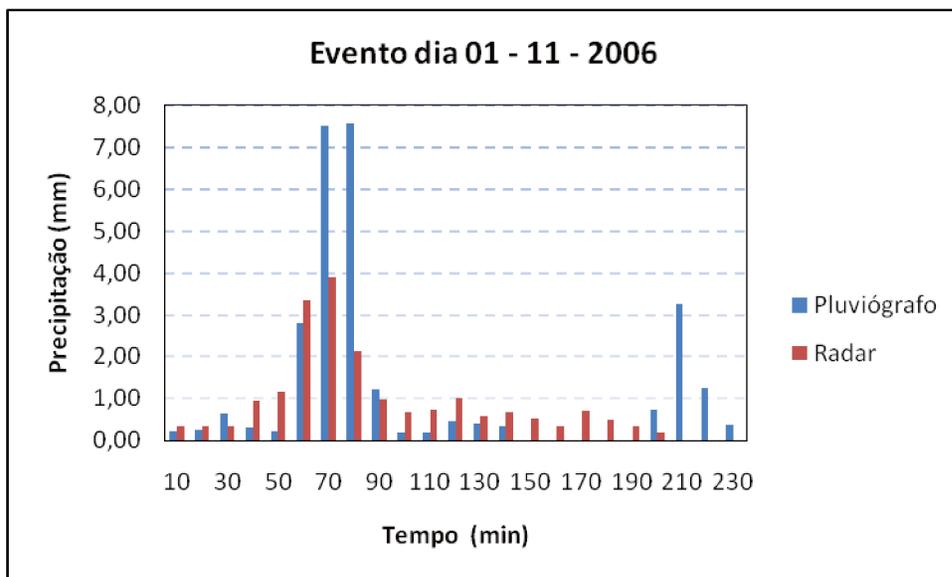


Figura 5.6: Hietograma comparando a precipitação medida por pluviógrafos com a estimada por radar meteorológico.

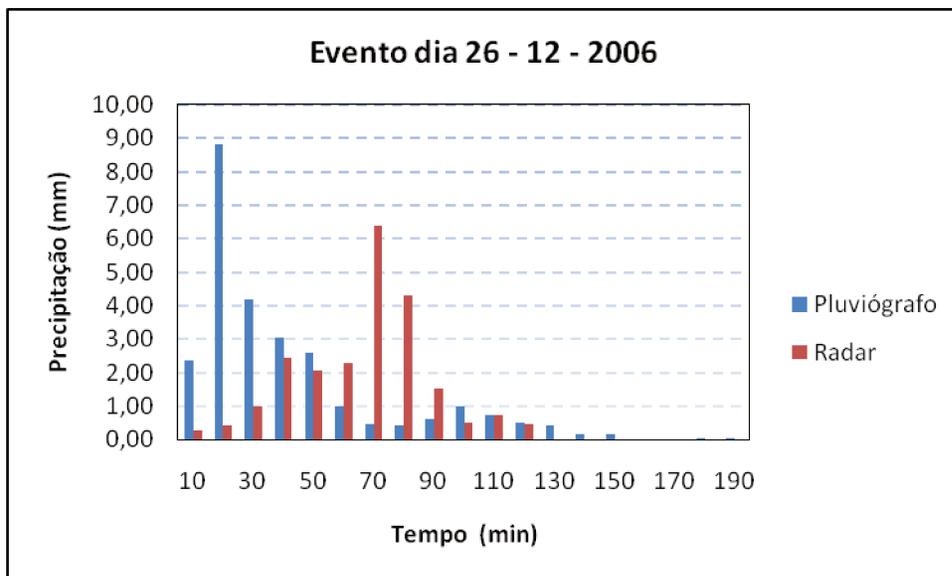


Figura 5.7: Hietograma comparando a precipitação medida por pluviógrafos com a estimada por radar meteorológico.

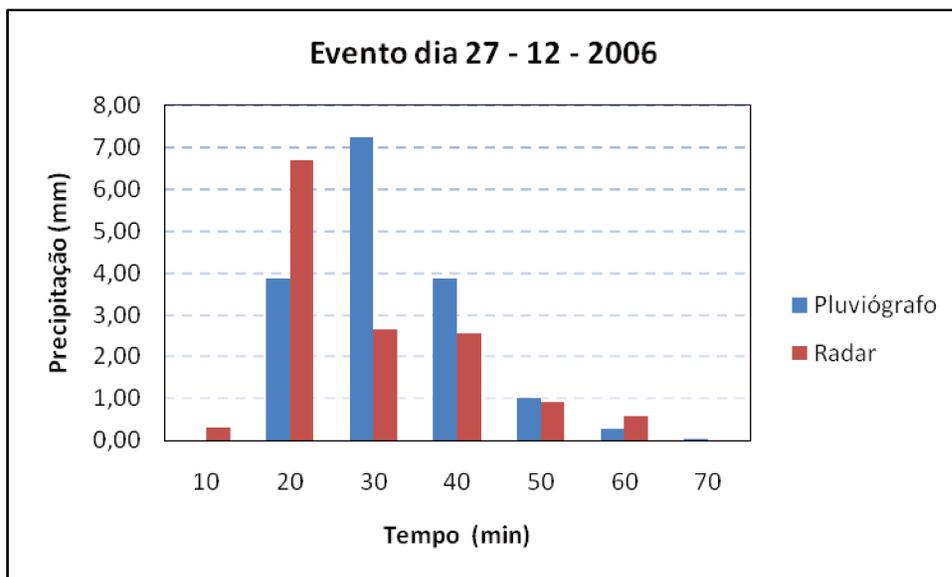
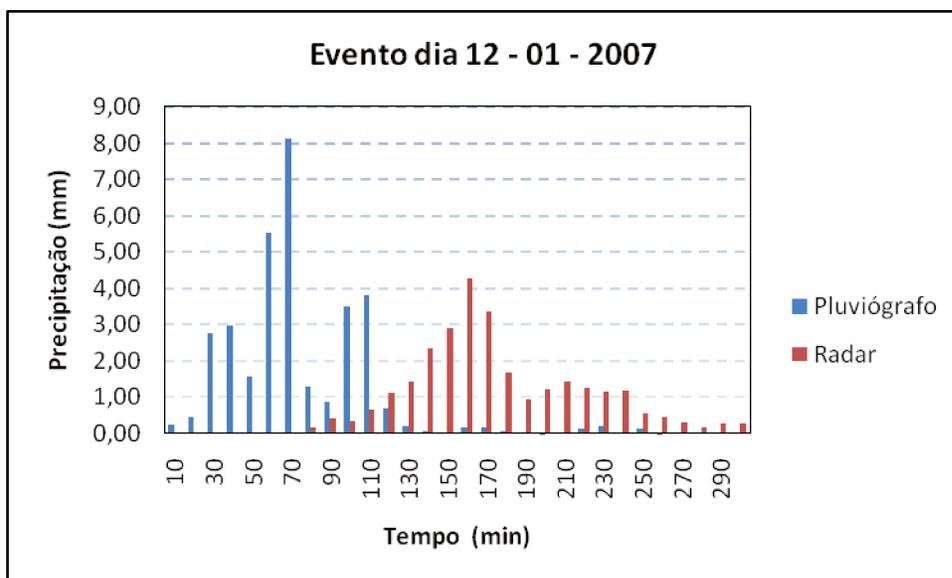


Figura 5.8: Hietograma comparando a precipitação medida por pluviógrafos com a estimada por radar meteorológico.



**Figura 5.9:** Hietograma comparando a precipitação medida por pluviógrafos com a estimada por radar meteorológico.

O fato de as medições por radar terem subestimados os valores medidos pelos pluviógrafos pode estar associado à utilização de uma única equação ZR “padrão” para a conversão da taxa de refletividade do radar em intensidade de precipitação, pois os parâmetros dessa relação podem variar de acordo com o tipo de chuva.

Austin (1987) fez comparações de dados de precipitação obtidas por nove postos pluviométricos e de radar meteorológico do evento ocorrido em 18/05/1977. Quando o autor modificou a relação ZR, a equação (3.2), com parâmetros  $a$  igual a 230 e  $b$  igual a 1,4, o radar indicou um total de 80 mm precipitado, aproximadamente 65% do montante medido pelos nove postos pluviométricos.

Gonçalves *et al.*, (2006) apresentaram a comparação, entre a chuva registrada nos postos pluviográficos Imobel e Limão e em suas respectivas quadrículas. A área de aplicação deste estudo foi a bacia do rio Cabucu de Baixo, localizada na zona norte da cidade de São Paulo. A chuva estimada pelo radar foi muito inferior à medida pelos postos, indicando a necessidade da calibração dos dados de radar por uma rede de superfície.

Trovati *et al.*, (2007) realizaram análises sobre a distribuição da chuva em área através de informações de radar e de pluviômetros e mostraram a ocorrência de desvios com significativa magnitude. O erro associado à comparação radar-pluviômetro para a chuva acumulada, integrada

em períodos horários, diários, mensais e semestrais, apresentou uma subestimativa pelo radar de um fator constante de aproximadamente três vezes.

Segundo Austin (1987), a cada instante, a intensidade da chuva varia significativamente em distâncias menores que 1 km, e, em um ponto, ela pode mudar em intervalos de tempo de um minuto ou menos. Dessa maneira, a chuva amostrada por pluviômetros pode não ser representativa do volume amostrado pelo radar. Da mesma forma, a taxa de chuva observada instantaneamente pelo radar pode não representar as intensidades que ocorrem entre os intervalos de observação.

Na análise dos dados de precipitação da bacia em estudo, Ralph Stettinger, foi obtido o coeficiente (G) médio de 4,84, com valores pontuais variando de 1,22 a 20,26, que podem ser visualizados na Tabela 5.3. Esse resultado mostra que os valores pontuais medidos por pluviógrafos variaram muito dos valores espaciais estimados pelo radar meteorológico, indicando que as medidas de radar precisam ser ajustadas com os dados de pluviógrafos.

Para os nove eventos selecionados foram obtidos os seguintes resultados de coeficiente (G), correlação linear (R) e desvio padrão, que podem ser visualizados nas Tabelas 5.3 a 5.5, a seguir:

**Tabela 5.3: Resultado dos Coeficientes (G = P/R) obtidos dos nove eventos selecionados.**

Evento	Coeficiente (G = P/R) razão entre a medida pontual pluviométrica e do radar meteorológico				G Médio
	Paranapanema	ETA	Sede	CBPO	
20/06/2005	-	18,50	8,13	19,34	15,32
24/01/2006	7,14	15,09	20,26	1,34	10,96
28/01/2006	1,44	2,19	2,06	1,86	1,89
21/02/2006	2,84	2,78	3,52	3,08	3,06
04/03/2006	1,28	1,29	1,76	3,78	2,03
01/11/2006	1,33	1,22	1,83	2,03	1,60
26/12/2006	3,92	-	3,59	2,59	3,37
27/12/2006	2,83	-	1,46	2,40	2,23
12/01/2007	2,84	-	3,07	3,33	3,08
<b>Média total</b>					<b>4,84</b>

A análise correlacional indica a relação entre duas variáveis lineares e os valores sempre serão entre (+1) e (-1). O sinal indica a direção se a correlação é positiva ou negativa, o tamanho da variável indica a força da correlação. Quando o coeficiente for negativo, significa uma correlação negativa entre as duas variáveis, isto é, se uma aumenta, a outra sempre diminui.

Interpretando  $R = 0,70$  para mais ou para menos indica uma forte correlação. Se  $R$  está entre  $0,30$  a  $0,70$ , positivo ou negativo, indica correlação moderada e  $R$  entre  $0$  a  $0,30$  demonstra uma fraca correlação (BOTTER *et al.*, 1996).

A análise os dados de precipitação do radar meteorológico e dos pluviógrafos, para os nove eventos obtidos para a bacia em estudo, Ralph Stettinger, constatou que os dados alcançaram uma correlação linear moderada ( $R$ ), conforme os valores que podem ser visualizados na Tabela 5.4.

**Tabela 5.4: Coeficiente de correlação linear ( $R$ ) entre os dados de precipitação estimados por radar meteorológico e medidos pelos pluviógrafos dos nove eventos selecionados.**

Evento	Coeficiente de Correlação Linear entre os dados de radar e pluviógrafos, nos pontos em análise				Coeficiente de Correlação Linear ( $R$ ) Médio
	Paranapanema	ETA	Sede	CBPO	
20/05/2005	-	0,74	0,50	0,74	0,66
24/01/2006	0,44	0,90	0,74	0,68	0,69
28/01/2006	0,91	0,44	0,58	0,22	0,54
21/02/2006	0,22	0,75	-0,02	-0,01	0,25
04/03/2006	0,64	0,79	0,34	-0,21	0,50
01/11/2006	0,34	0,66	0,74	0,22	0,49
26/12/2006	0,17	-	0,29	-0,02	0,16
27/12/2006	0,16	-	0,27	0,64	0,36
12/01/2007	-0,36	-	-0,28	-0,43	-0,36

**Tabela 5.5: Desvio Padrão encontrado na comparação dos dados de precipitação estimados por radar meteorológico e medidos pelos pluviógrafos dos nove eventos selecionados.**

Evento	Desvio Padrão encontrado na comparação de dados de radar e pluviógrafos, nos pontos em análise				Desvio Padrão Médio
	Paranapanema	ETA	Sede	CBPO	
20/06/2005	1,63	2,37	3,05	2,33	2,34
24/01/2006	2,45	2,62	3,20	1,42	2,42
28/01/2006	2,33	1,64	2,21	1,95	2,04
21/02/2006	1,72	1,39	2,21	2,12	1,86
04/03/2006	1,00	1,77	1,31	1,32	1,35
01/11/2006	1,20	2,16	2,23	1,61	1,80
26/12/2006	1,93	1,78	1,35	1,64	1,67
27/12/2006	2,58	2,67	1,98	3,19	2,61
12/01/2007	1,26	1,41	1,33	1,20	1,30

A comparação dos dados de precipitação estimados por radar meteorológico e medidos por pluviógrafos obtiveram valores distintos aos verificados em outros estudos. Smith *et al.*

(1975) encontrou coeficiente de correlação linear de dados pontuais de radar e pluviômetros, em estudos de otimização de equações Z - R de 0,68. Barge *et al.* (1979) compararam os resultados de radar meteorológico e de pluviômetros no Canadá. Com vinte dias de dados obtiveram um coeficiente G com média de 1,15 e desvio padrão de 2,95, porém ao analisar um evento com seis dias de duração constataram valores de G variando de 0,28 a 3.

Pereira Filho (2007), analisando diagramas de espalhamento da média espacial da precipitação acumulada diária medida com pluviômetros versus as respectivas com radar meteorológico, encontrou um coeficiente de variação CV (igual ao desvio padrão da amostra dividido pela média) entre pluviômetros e radar meteorológico de 0,60. Não obstante, ressalta-se que a qualidade das estimativas da chuva acumulada é afetada por erros inerentes ao radar meteorológico, pois resultados recentes revelam que os erros podem ser superiores a 100%.

## 5.3 MONITORAMENTO HIDROLÓGICO

### 5.3.1 Determinação da curva chave para o posto fluviométrico

Para a determinação da curva chave do posto fluviométrico da Praça Ralph Stettinger foram utilizados os dados obtidos por Vicentini (2000), que realizou medições diretas de velocidade com molinete e flutuador, apresentados nas Tabelas 5.6 e 5.7.

**Tabela 5.6: Medições efetuadas com molinete no posto fluviométrico da praça Ralph Stettinger. Fonte: (VICENTINI, 2000).**

H água (m)	Tempo (s)	Distância (m)	V(m/s)	Vmed (m/s)	Q (m <sup>3</sup> /s)
0,14	54,0	88,0	1,63	1,47	1,23
0,14	53,0	88,0	1,66	1,49	1,25
0,18	52,0	88,0	1,69	1,52	1,64
0,20	50,0	88,0	1,76	1,58	1,90
2,10	3,70	47,5	12,84	11,55	145,53
2,25	4,00	35,5	8,88	7,99	107,87
2,00	6,06	47,5	7,83	7,05	84,60
1,50	6,45	47,5	7,36	6,63	59,67
1,30	6,50	47,5	7,31	6,58	51,32
1,05	6,85	47,5	6,93	6,24	39,31

**Tabela 5.7: Medições efetuadas com flutuador no posto fluviométrico da praça Ralph Stettinger. Fonte: (VICENTINI, 2000).**

Data	H água (m)	H ap (m)	Rotações	tempo (s)	Seção	Altura do aparelho	Rot/s	V (m/s)	Vmed (m/s)	Q (m <sup>3</sup> /s)
18/11/1998	0,35	0,21	44	60	Central	0,6h	7,33	1,96	1,96	4,12
5/12/1998	0,29	0,17	41	60	Central	0,6h	6,83	1,83	1,83	3,18
5/12/1998	0,29	0,17	43	60	Central	0,6h	7,17	1,92	1,92	3,34
22/3/2000	0,32	0,19	63	60	Central	0,6h	10,50	2,81	2,81	5,40
22/3/2000	0,84	0,76	903	50	Central	0,1h	18,06	4,66	4,20	21,17
22/3/2000	0,84	0,76	967	50	Central	0,1h	19,34	4,99	4,49	22,63
22/3/2000	0,75	0,68	519	50	Central	0,1h	10,38	2,68	2,41	10,85
22/3/2000	0,72	0,65	516	50	Central	0,1h	10,32	2,67	2,40	10,37
22/3/2000	0,64	0,58	404	50	Central	0,1h	8,08	2,09	1,89	7,26
22/3/2000	0,60	0,54	398	50	Central	0,1h	7,96	2,06	1,85	6,66
22/3/2000	0,55	0,50	473	50	Central	0,1h	9,46	2,44	2,20	7,26
22/3/2000	0,49	0,44	477	50	Central	0,1h	9,54	2,46	2,22	6,53
22/3/2000	0,44	0,40	323	50	Central	0,1h	6,46	1,67	1,50	3,96
22/3/2000	0,42	0,38	369	50	Central	0,1h	7,38	1,91	1,72	4,33
22/3/2000	0,39	0,35	384	50	Central	0,1h	7,68	1,98	1,79	4,19
22/3/2000	0,39	0,35	362	50	Central	0,1h	7,24	1,87	1,68	3,93
22/3/2000	0,39	0,35	368	50	Central	0,1h	7,36	1,90	1,71	4,00
22/3/2000	0,37	0,33	328	50	Central	0,1h	6,56	1,70	1,53	3,40
22/3/2000	0,37	0,33	331	50	Central	0,1h	6,62	1,71	1,54	3,42
22/3/2000	0,34	0,31	330	50	Central	0,1h	6,60	1,71	1,54	3,14
22/3/2000	0,34	0,31	340	50	Central	0,1h	6,80	1,76	1,58	3,22
22/3/2000	0,34	0,31	351	50	Central	0,1h	7,02	1,81	1,63	3,33
22/3/2000	0,33	0,30	363	50	Central	0,1h	7,26	1,88	1,69	3,35
22/3/2000	0,32	0,29	362	50	Central	0,1h	7,24	1,87	1,68	3,23
22/3/2000	0,32	0,29	355	50	Central	0,1h	7,10	1,83	1,65	3,17
22/3/2000	0,32	0,29	337	50	Central	0,1h	6,74	1,74	1,57	3,01
22/3/2000	0,32	0,29	326	50	Central	0,1h	6,52	1,69	1,52	2,92
22/3/2000	0,31	0,28	320	50	Central	0,1h	6,40	1,65	1,49	2,77
22/3/2000	0,31	0,28	308	50	Central	0,1h	6,16	1,59	1,43	2,66
22/3/2000	0,30	0,27	313	50	Central	0,1h	6,26	1,61	1,46	2,63
22/3/2000	0,30	0,27	315	50	Central	0,1h	6,30	1,63	1,47	2,65
22/3/2000	0,29	0,26	317	50	Central	0,1h	6,34	1,64	1,47	2,56
22/3/2000	0,29	0,26	325	50	Central	0,1h	6,50	1,68	1,51	2,63
22/3/2000	0,29	0,26	323	50	Central	0,1h	6,46	1,67	1,50	2,61
02/3/2000	0,25	0,23	323	50	Central	0,1h	6,46	1,67	1,50	2,25
02/3/2000	0,25	0,23	329	50	Central	0,1h	6,58	1,70	1,53	2,30
22/3/2000	0,24	0,22	303	50	Central	0,1h	6,06	1,57	1,41	2,03
22/3/2000	0,24	0,22	306	50	Central	0,1h	6,12	1,58	1,42	2,04
22/3/2000	0,24	0,22	296	50	Central	0,1h	5,92	1,53	1,38	1,99
22/3/2000	0,24	0,22	296	50	Central	0,1h	5,92	1,53	1,38	1,99
22/3/2000	0,24	0,22	305	50	Central	0,1h	6,10	1,58	1,42	2,04
22/3/2000	0,23	0,21	301	50	Central	0,1h	6,02	1,56	1,40	1,93
22/3/2000	0,23	0,21	300	50	Central	0,1h	6,00	1,55	1,40	1,93
22/3/2000	0,22	0,20	300	50	Central	0,1h	6,00	1,55	1,40	1,85
22/3/2000	0,22	0,20	295	50	Central	0,1h	5,90	1,52	1,37	1,81

A partir, das medições efetuadas, foram obtidas as vazões correspondentes pela multiplicação das velocidades médias pela área molhada da respectiva altura de lâmina d'água. A relação cota-descarga obtida foi representada pela curva chave do posto, sob a forma  $H = f(Q)$ .

Após lançar os dados de vazão e lâmina d'água em um gráfico, obteve-se um conjunto de pontos. A partir desses pontos foi encontrada a regressão que melhor se ajusta aos pontos. A regressão que obteve o melhor coeficiente de determinação ( $R^2$ ) foi a regressão usando a equação potencial, representada na equação (5.1). A Figura 5.10, apresenta a regressão que é a curva chave do posto fluviométrico na Praça Ralph Stettinger.

A equação da curva chave para o posto fluviométrico localizado à Praça Ralph Stettinger é:

$$H = 0,1705Q^{0,5443} \quad (5.1)$$

Na qual:

H = lâmina de água (m);

Q = vazão ( $m^3/s$ ).

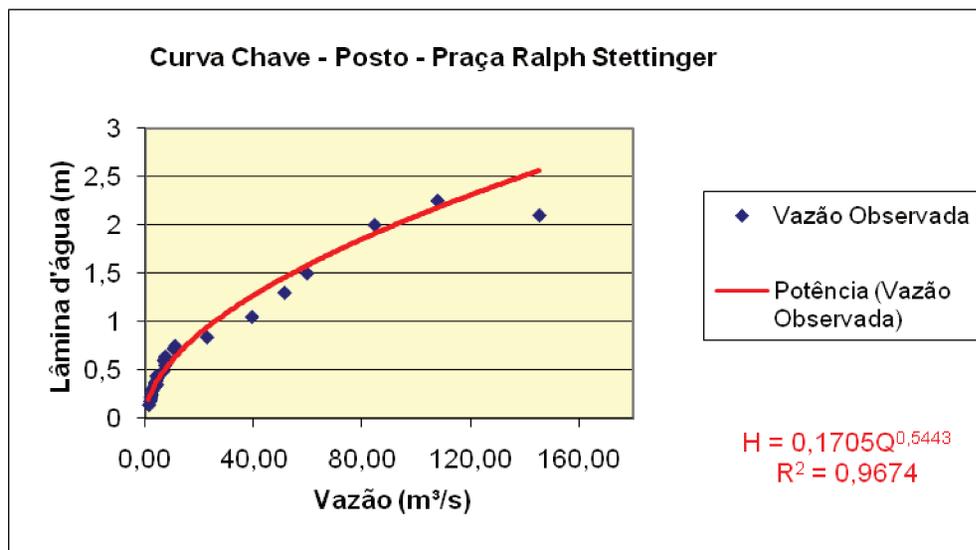


Figura 5.10: Curva chave do posto fluviométrico localizado na Praça Ralph Stettinger.

## 5.4 DISCRETIZAÇÃO DA BACIA E ANÁLISE DO SISTEMA DE DRENAGEM

### 5.4.1 Discretização das sub-bacias

As características físicas para as sub-bacias, obtidas do monitoramento da bacia hidrográfica em estudo, Ralph Stettinger, são apresentadas nas Tabelas 5.8 e 5.9 para as bacias com discretizações detalhada (divisão em 6 sub-bacias) e simplificada (considerando só uma bacia, ou seja, a bacia inteira), respectivamente. Nestas tabelas também são exibidos os valores da largura do escoamento (Equação 4.1), a área da sub-bacia, a porcentagem de área impermeável e a declividade média do talvegue para cada sub-bacia.

**Tabela 5.8: Características das Sub-bacias utilizadas na simulação com discretização detalhada.**

Discretização detalhada	Sub-bacia	Largura do escoamento (m)	Área (ha)	% Área Impermeável	Declividade (m/m)
6 Sub-bacias	1	916,27	213,88	80	0,0613
	2	702,99	82,15	80	0,0570
	3	379,76	80,50	80	0,0608
	4	938,13	168,77	80	0,0406
	5	783,69	92,37	80	0,0874
	6	653,73	121,83	80	0,0608

**Tabela 5.9: Características da Sub-bacia utilizada na simulação com discretização simples.**

Discretização simplificada	Sub-bacia	Largura do escoamento (m)	Área (ha)	% Área Impermeável	Declividade (m/m)
1 Sub-bacia	1	4374	757,59	80	0,083

A representação do sistema de drenagem para a discretização detalhada consiste em 21 trechos: 2 canais irregulares, 16 canais retangulares e 3 canais trapezoidais. A discretização simplificada consiste em 12 trechos, sendo estes classificados em 2 canais irregulares, 7 canais

retangulares e 2 canais trapezoidais. As informações sobre o sistema de drenagem foram fornecidas pela SANASA.

As Figuras 5.11 e 5.12 mostram os desenhos esquemáticos das concepções dos canais e sub-bacias para a simulação detalhada (6 sub-bacias) e simplificada (1 sub-bacia), respectivamente. As Tabelas 5.10 e 5.11 apresentam as características dos canais para a discretização detalhada (6 sub-bacias) e simplificada (1 sub-bacia), respectivamente.

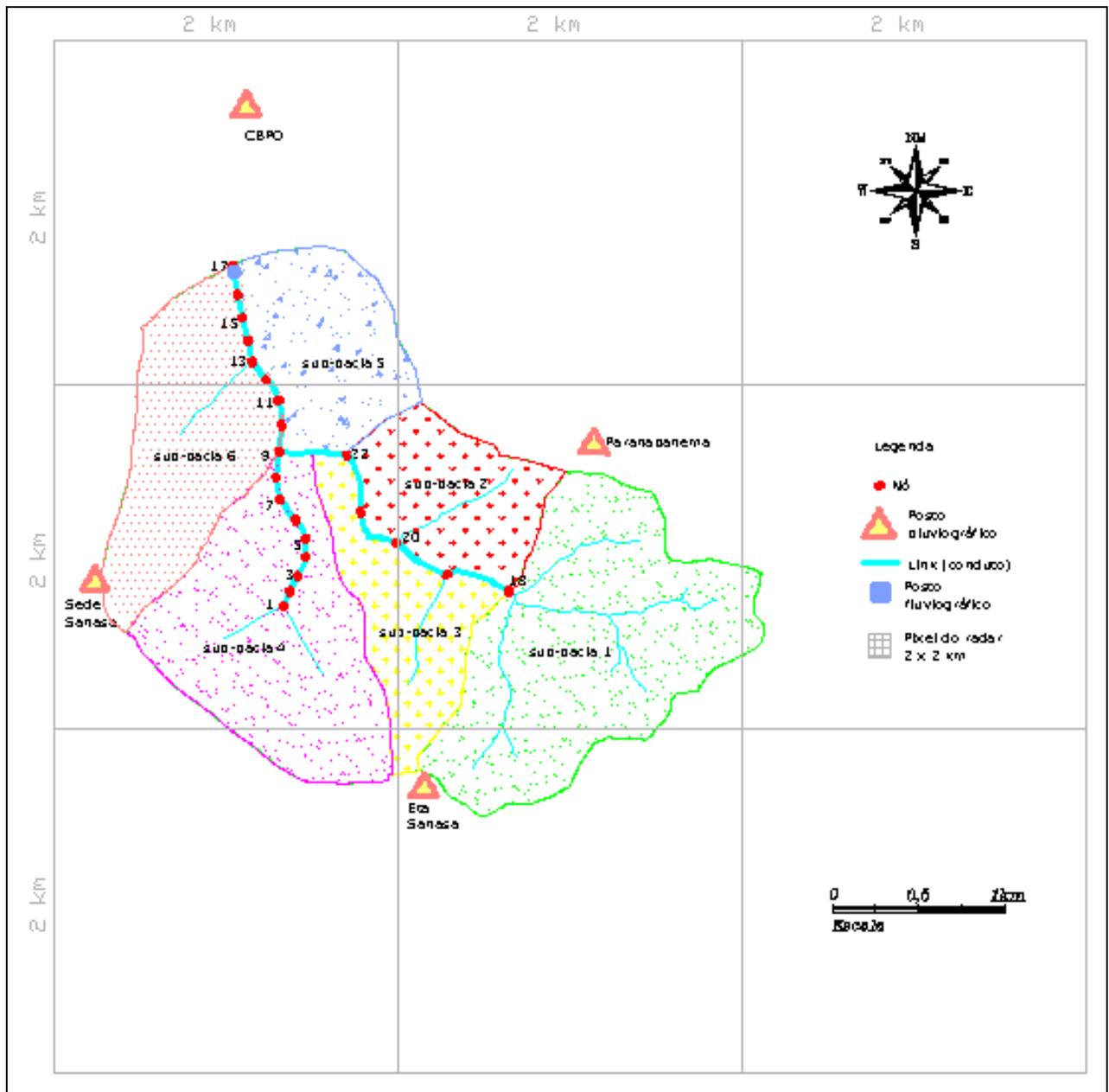


Figura 5.11: Bacia Hidrográfica Ralph Stettinger com discretização detalhada em seis sub-bacias.

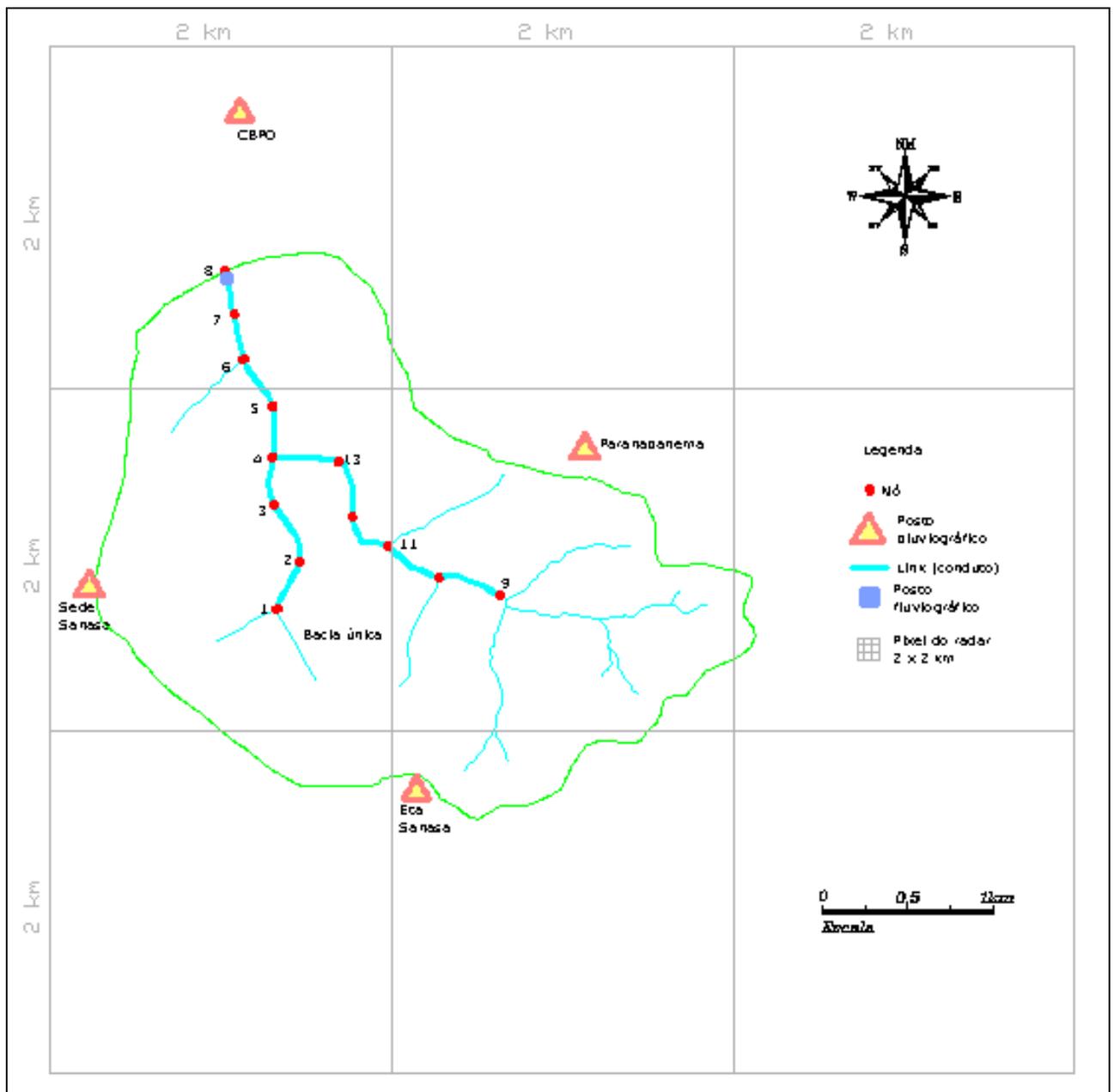


Figura 5.12: Bacia Hidrográfica Ralph Stettinger com discretização simplificada em uma sub-bacia.

**Tabela 5.10: Características do canal para a discretização detalhada (6 sub-bacias), da bacia em estudo.**

Conduto	Nó	Nó	Base (m)	Altura (m)	Comprimento (m)	Seção Transversal	Declividade (m/m)
01	01	02	2,5	2,1	100,00	Retangular Fechado	0,0090
02	02	03	2,5	2,1	100,00	Retangular Fechado	0,0100
03	03	04	2,5	2,1	100,00	Retangular Fechado	0,0180
04	04	05	2,5	2,1	150,00	Retangular Fechado	0,0167
05	05	06	2,5	2,1	102,00	Retangular Fechado	0,0432
06	06	07	2,5	2,1	98,00	Retangular Fechado	0,0260
07	07	08	2,5	2,1	98,00	Retangular Fechado	0,0211
08	08	09	2,5	2,1	127,00	Retangular Fechado	0,0058
09	09	10	5,6	3,6	108,00	Retangular Aberto	0,0256
10	10	11	5,6	2,4	165,00	Retangular Aberto	0,0039
11	11	12	5,0	57	200,00	Trapézio Aberto	0,0052
12	12	13	5,0	57	204,00	Trapézio Aberto	0,0134
13	13	14	5,5	3,0	94,00	Retangular Aberto	0,0149
14	14	15	6,0	3,0	122,00	Retangular Aberto	0,0150
15	15	16	6,0	3,0	158,00	Retangular Aberto	0,0112
16	16	17	4,0	45	256,00	Trapézio Aberto	0,0063
17	18	19	--	--	500,00	Irregular	0,0013
18	19	20	--	--	415,00	Irregular	0,0096
19	20	21	5,0	2,5	220,00	Retangular Fechado	0,0180
20	21	22	5,0	2,5	190,00	Retangular Fechado	0,0320
21	22	09	5,0	2,5	380,00	Retangular Fechado	0,0290

**Tabela 5.11: Características do canal para a discretização simplificada (1 sub-bacia), da bacia em estudo.**

Conduto	Nó	Nó	Base (m)	Altura (m)	Comprimento (m)	Seção Transversal	Declividade (m/m)
01	01	02	2,5	2,1	300,00	Retangular Fechado	0,0123
02	02	03	2,5	2,1	252,00	Retangular Fechado	0,0366
03	03	04	2,5	2,1	371,00	Retangular Fechado	0,0200
04	04	05	5,6	3,6	273,00	Retangular Aberto	0,0148
05	05	06	5,0	5,7	404,00	Trapézio Aberto	0,0150
06	06	07	6,0	3,0	374,00	Retangular Aberto	0,0131
07	07	08	4,0	4,5	256,00	Trapézio Aberto	0,0063
08	09	10	--	--	500,00	Irregular	0,0013
09	10	11	--	--	415,00	Irregular	0,0096
10	11	12	5,0	2,5	220,00	Retangular Fechado	0,0180
11	12	13	5,0	2,5	190,00	Retangular Fechado	0,0320
12	13	04	5,0	2,5	380,00	Retangular Fechado	0,0290

## 5.5 CALIBRAÇÃO E ANÁLISE DOS PARÂMETROS DO MODELO SWMM

### 5.5.1 Calibração do modelo

Os resultados obtidos na calibração dos parâmetros para os cinco primeiros eventos medidos por pluviógrafos, para os dois níveis de discretização aplicados à bacia Ralph Stettinger, obtiveram bons ajustes representados pelo coeficiente de eficiência (E) de Nash e Sutcliffe (1970) e pelo coeficiente de correlação (R). Para a bacia com discretização detalhada foi obtido um coeficiente de eficiência médio (E) de 0,85, coeficiente de correlação (R) médio de 0,93 e erros médios, na vazão de pico e volume escoado, de 10,80% e 22,45%, respectivamente. Na bacia com discretização simplificada obteve-se um coeficiente de eficiência médio (E) de 0,83, um coeficiente de correlação médio (R) de 0,92 e erros médios, na vazão de pico e volume escoado, de 9,25% e 27,02%, respectivamente. Os resultados gerados para os cinco primeiros eventos calibrados, usando dados de precipitação medidos por pluviógrafos, tanto para bacia detalhada quanto para a simplificada, apresentam-se disponíveis nas Tabelas 5.12 a 5.15.

Garcia (2005) também aplicou o modelo SWMM para simulações de vazões, em uma bacia hidrográfica com área de 4,95 km<sup>2</sup>, e obteve resultados satisfatórios na calibração dos parâmetros. Na discretização detalhada da bacia obteve-se um coeficiente de correlação médio de 0,95 para a vazão e erros médios, na vazão de pico e no volume escoado, de 2,9% e 17,1%, respectivamente. Já na discretização simplificada, desta bacia, obteve-se um coeficiente de correlação médio de 0,94 e erros médios de 6,3% e 17,3% para as respectivas variáveis.

**Tabela 5.12: Parâmetros obtidos na calibração do modelo para bacia com discretização detalhada (6 sub-bacias), utilizando dados de precipitação obtidos por pluviógrafos.**

Evento	ni	np	di (mm)	dp (mm)	lo (mm/h)	lb (mm/h)	k (l/s)	n conduto	R	E
20/05/2005	0,010	0,23	2,00	5,00	25,4	2,0	0,00115	0,015	0,94	0,86
24/01/2006	0,011	0,25	2,80	8,00	25,4	2,0	0,00115	0,013	0,93	0,87
28/01/2006	0,009	0,25	2,00	5,00	25,4	2,0	0,00115	0,013	0,94	0,87
21/02/2006	0,009	0,25	2,00	5,00	25,4	2,0	0,00115	0,013	0,93	0,86
04/03/2006	0,011	0,25	3,80	12,00	25,4	2,0	0,00115	0,015	0,90	0,76
<b>Média</b>	<b>0,010</b>	<b>0,25</b>	<b>2,52</b>	<b>7,00</b>	<b>25,4</b>	<b>2,0</b>	<b>0,00115</b>	<b>0,014</b>	<b>0,93</b>	<b>0,85</b>

**Tabela 5.13: Parâmetros obtidos na calibração do modelo para bacia com discretização simplificada (1 sub-bacia), utilizando dados de precipitação obtidos por pluviógrafos.**

Evento	ni	np	di (mm)	dp (mm)	lo (mm/h)	lb (mm/h)	k (l/s)	n conduto	R	E
20/05/2005	0,010	0,25	1,27	5,00	25,4	2,0	0,00115	0,015	0,92	0,85
24/01/2006	0,012	0,25	2,80	10,00	25,4	2,0	0,00115	0,013	0,92	0,84
28/01/2006	0,011	0,25	2,00	5,00	25,4	2,0	0,00115	0,013	0,91	0,82
21/02/2006	0,010	0,25	2,00	5,00	25,4	2,0	0,00115	0,013	0,94	0,88
04/03/2006	0,012	0,25	3,80	12,00	25,4	2,0	0,00115	0,015	0,90	0,77
<b>Média</b>	<b>0,011</b>	<b>0,25</b>	<b>2,38</b>	<b>7,40</b>	<b>25,4</b>	<b>2,0</b>	<b>0,00115</b>	<b>0,014</b>	<b>0,92</b>	<b>0,83</b>

**Tabela 5.14: Resultados obtidos na simulação dos eventos, usando dados de pluviógrafos, para a bacia com discretização detalhada (6 sub-bacias).**

Evento	Qp cal (m <sup>3</sup> /s)	Qp obs (m <sup>3</sup> /s)	Ves cal (m <sup>3</sup> )	Ves Obs (m <sup>3</sup> )	Qp cal/ Qp obs	Ves cal/ Ves obs	Erro no Qp (%)	Erro no Ves (%)	R	E
20/05/2005	73,90	84,55	4253040	3295008	0,87	1,29	12,60	29,08	0,94	0,86
24/01/2006	30,49	31,79	1271376	1185659	0,96	1,07	4,09	7,23	0,93	0,87
28/01/2006	65,19	76,80	1791828	1574100	0,85	1,14	15,12	13,83	0,94	0,87
21/02/2006	36,63	39,80	1519200	1092816	0,92	1,39	7,96	39,02	0,93	0,86
04/03/2006	27,22	31,74	2122524	1723929	0,86	1,23	14,24	23,12	0,90	0,76
<b>Média</b>	-	-	-	-	-	-	<b>10,80</b>	<b>22,45</b>	<b>0,93</b>	<b>0,85</b>

**Tabela 5.15: Resultados obtidos na simulação dos eventos, usando dados de pluviógrafos, para a bacia com discretização simplificada (1 bacia).**

Evento	Qp cal (m <sup>3</sup> /s)	Qp obs (m <sup>3</sup> /s)	Ves cal (m <sup>3</sup> )	Ves Obs (m <sup>3</sup> )	Qp cal/ Qp obs	Ves cal/ Ves obs	Erro no Qp (%)	Erro no Ves (%)	R	E
20/05/2005	80,82	84,55	4242240	3086784	0,96	1,37	4,41	37,43	0,92	0,85
24/01/2006	29,59	31,79	1399824	1185626	0,93	1,18	6,92	18,07	0,92	0,84
28/01/2006	67,98	76,80	1733940	1515240	0,89	1,14	11,48	14,43	0,91	0,82
21/02/2006	35,27	39,80	1450080	1092816	0,89	1,33	11,38	32,69	0,94	0,88
04/03/2006	27,92	31,74	2283876	1723929	0,88	1,32	12,04	32,48	0,90	0,77
<b>Média</b>	-	-	-	-	-	-	<b>9,25</b>	<b>27,02</b>	<b>0,92</b>	<b>0,83</b>

Em seguida, podem ser visualizados nas Figuras 5.13 a 5.22 os hidrogramas calculados e os observados dos eventos simulados, gerados com os parâmetros encontrados na calibração do modelo para cada evento individualmente. Comparando os hidrogramas calculados com os hidrogramas observados notou-se que a vazão simulada reproduziu com boa aproximação os valores da vazão observada. Dessa forma, os resultados obtidos na calibração do modelo SWMM, individualmente para cada evento, foram considerados bons.

Para a calibração dos parâmetros foram considerados os cinco primeiros eventos: 20/06/05, 24/01/06, 28/01/06, 21/02/06, 04/03/06, e para a verificação da calibração foram analisados os eventos: 01/11/06, 26/12/06, 27/12/06, 12/01/07.

Para validação dos parâmetros foi utilizado um único conjunto de parâmetros que sinalizou o melhor ajuste, pois forneceu o melhor coeficiente de eficiência. A Tabela 5.16 apresenta os parâmetros escolhidos para a validação do modelo SWMM.

**Tabela 5.16: Parâmetros utilizados na validação do modelo para bacia com discretização detalhada (6 sub-bacias) e para a bacia com discretização simplificada (1 sub-bacia).**

Evento	ni	np	di (mm)	dp (mm)	lo (mm/h)	lb (mm/h)	k (l/s)	n conduto	R	E
<b>Bacia detalhada (6 sub-bacias)</b>	<b>0,009</b>	<b>0,25</b>	<b>2,00</b>	<b>5,00</b>	<b>25,4</b>	<b>2,0</b>	<b>0,00115</b>	<b>0,013</b>	<b>0,94</b>	<b>0,87</b>
<b>Bacia única (1 sub-bacia)</b>	<b>0,010</b>	<b>0,25</b>	<b>2,00</b>	<b>5,00</b>	<b>25,4</b>	<b>2,0</b>	<b>0,00115</b>	<b>0,013</b>	<b>0,94</b>	<b>0,88</b>

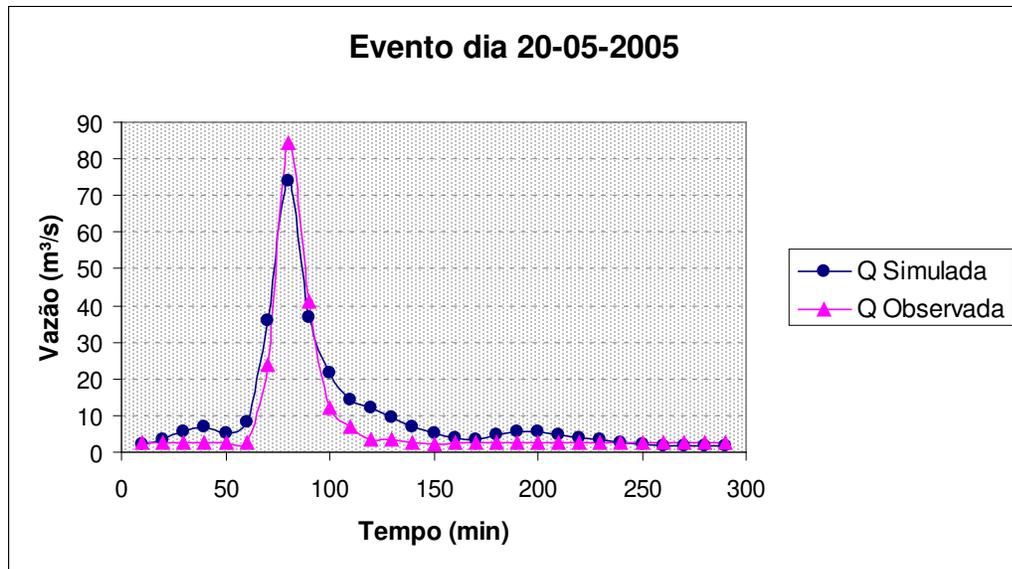


Figura 5.13: Evento do dia 20-05-2005, para discretização detalhada (6 sub-bacias), usando dados de precipitação obtidos por pluviógrafos.

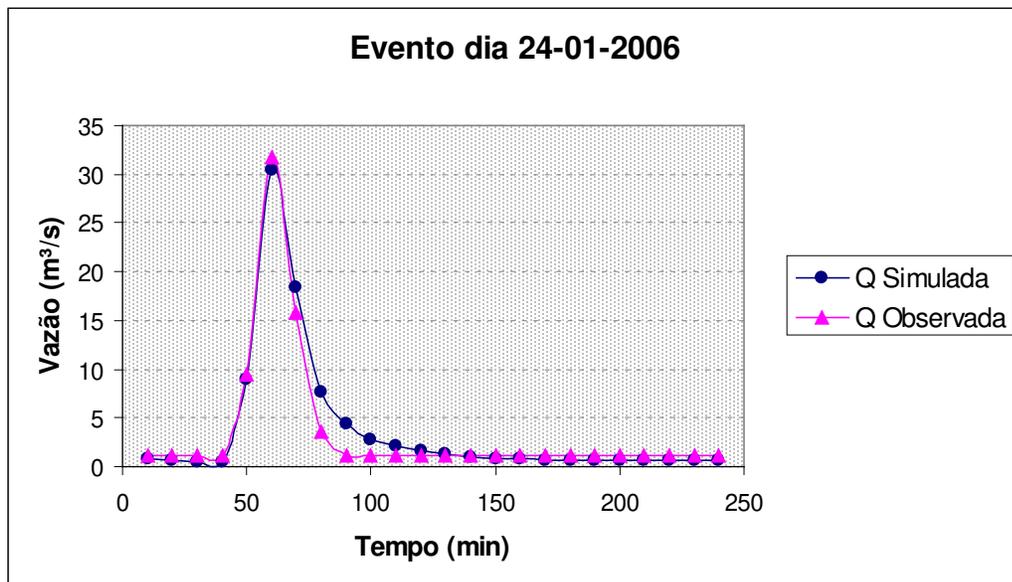


Figura 5.14: Evento do dia 24-01-2006, para discretização detalhada (6 sub-bacias), usando dados de precipitação obtidos por pluviógrafos.

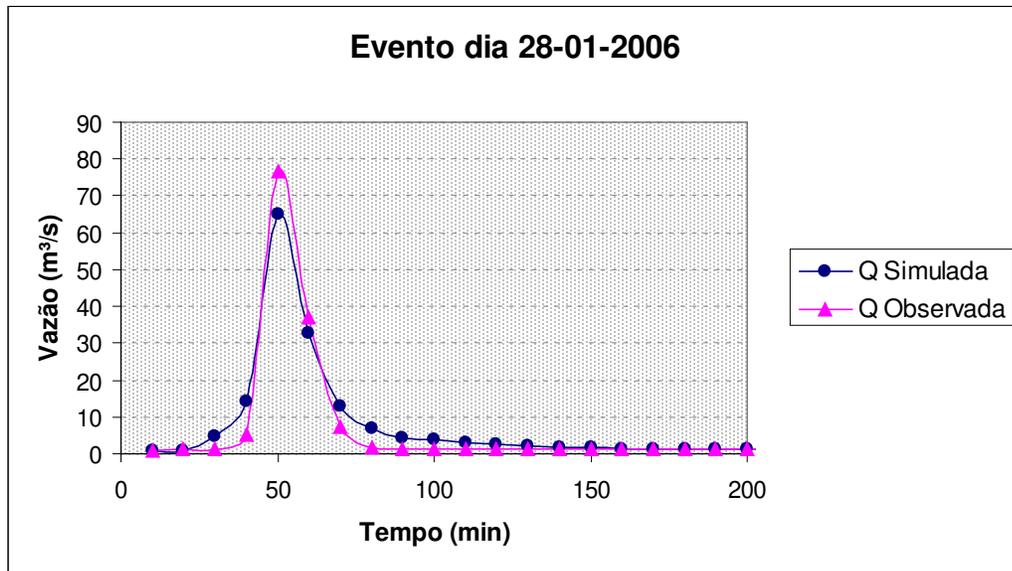


Figura 5.15: Evento do dia 28-01-2006, para discretização detalhada (6 sub-bacias), usando dados de precipitação obtidos por pluviógrafos.

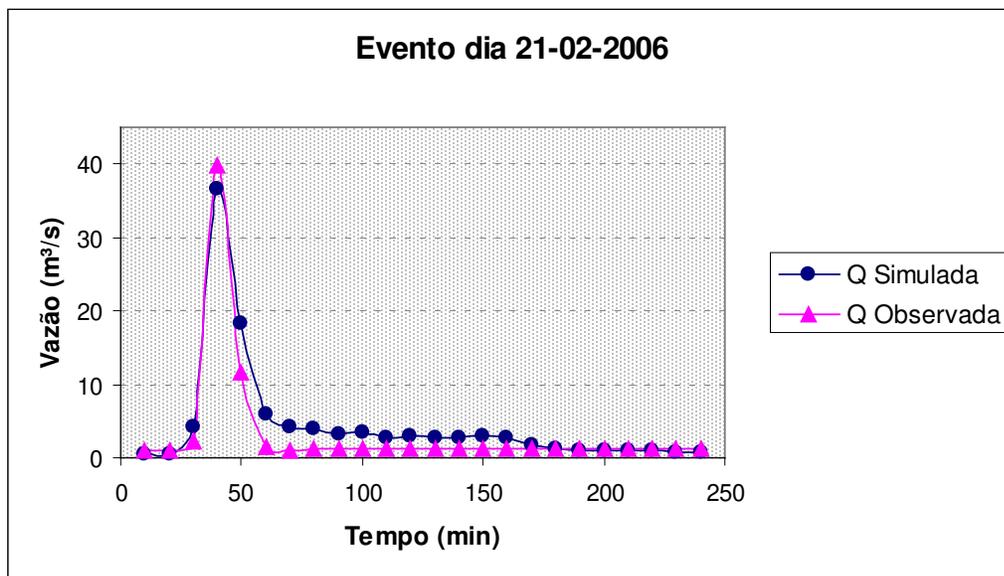
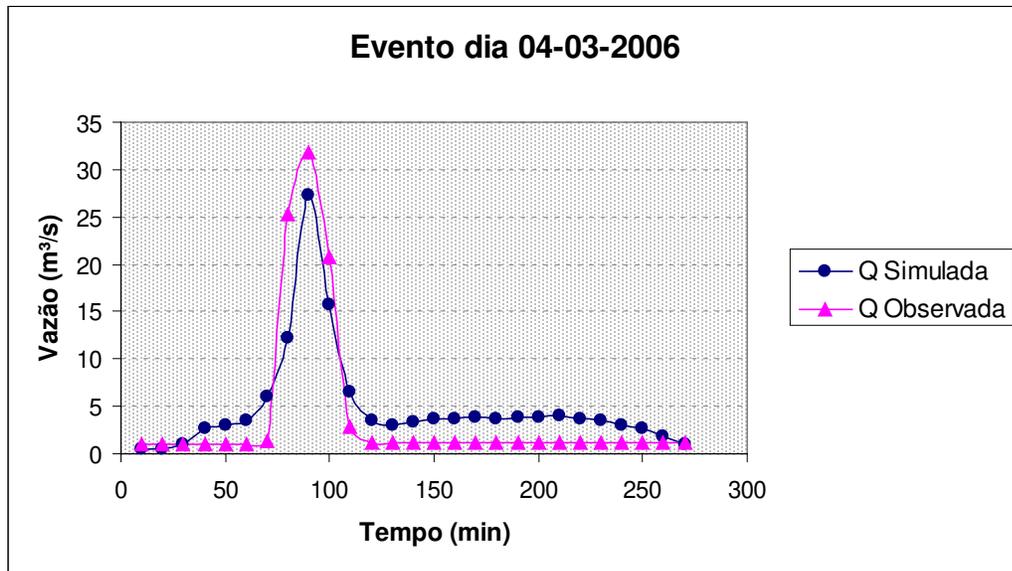
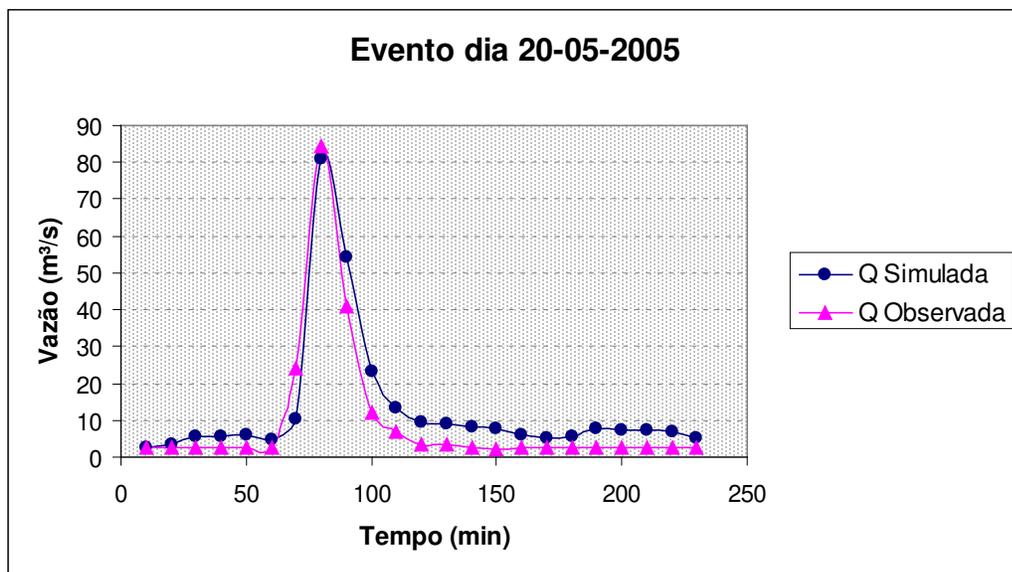


Figura 5.16: Evento do dia 21-02-2006, para discretização detalhada (6 sub-bacias), usando dados de precipitação obtidos por pluviógrafos.



**Figura 5.17:** Evento do dia 04-03-2006, para discretização detalhada (6 sub-bacias), usando dados de precipitação obtidos por pluviógrafos.



**Figura 5.18:** Evento do dia 20-05-2005, para discretização simplificada (1 sub-bacia), usando dados de precipitação obtidos por pluviógrafos.

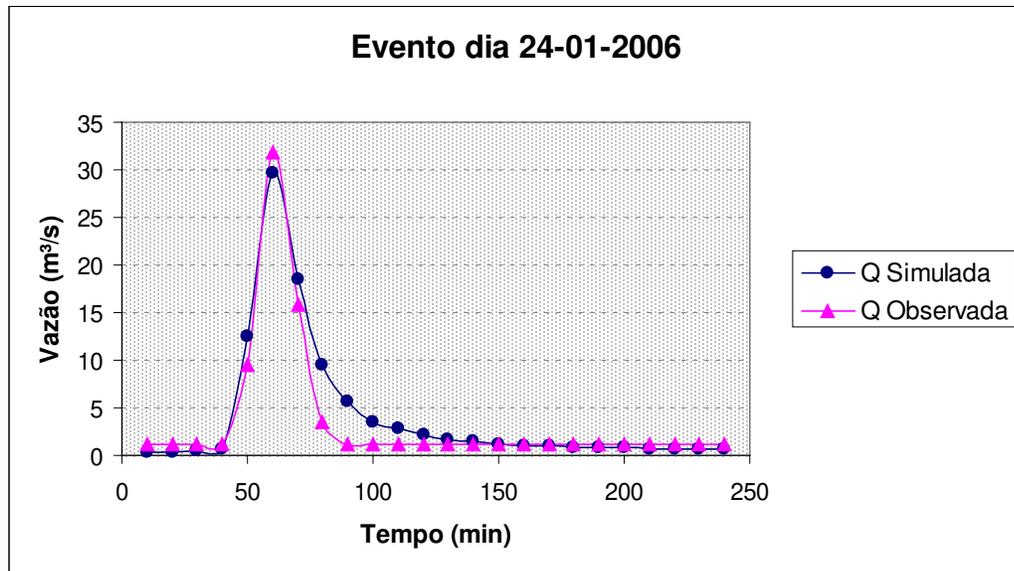


Figura 5.19: Evento do dia 24-01-2006, para discretização simplificada (1 sub-bacia), usando dados de precipitação obtidos por pluviógrafos.

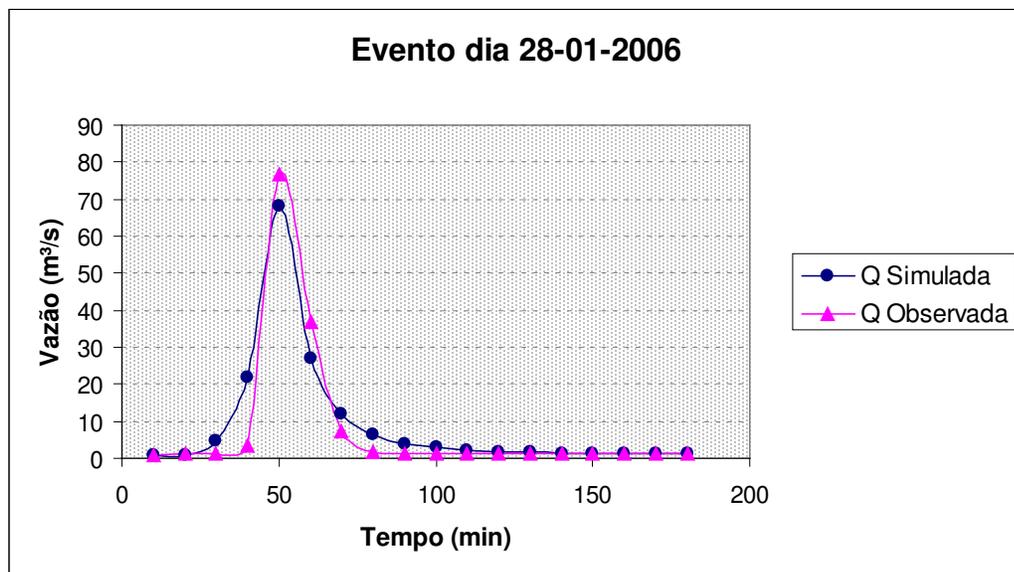


Figura 5.20: Evento do dia 28-01-2006, para discretização simplificada (1 sub-bacia), usando dados de precipitação obtidos por pluviógrafos.

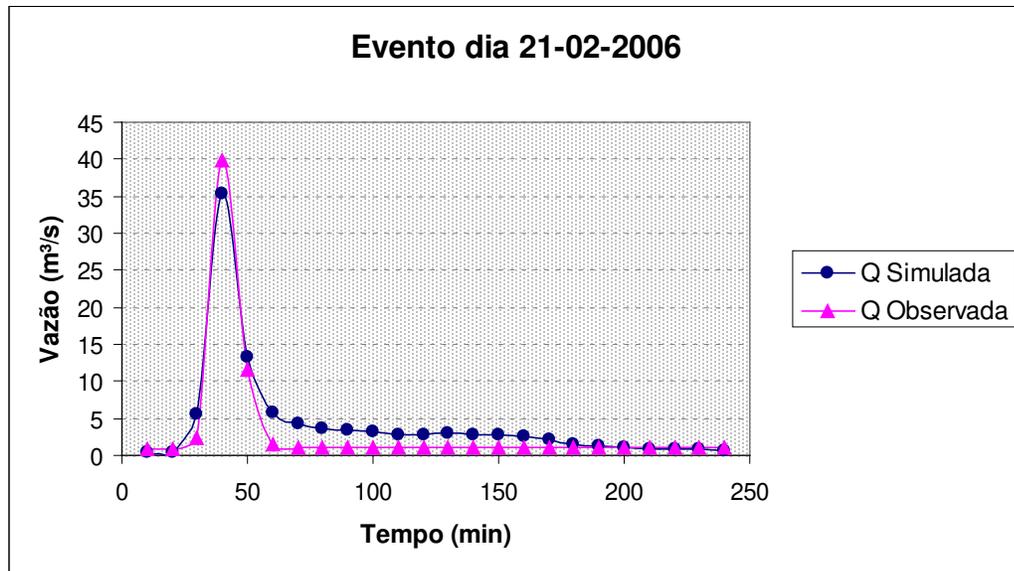


Figura 5.21: Evento do dia 21-02-2006, para discretização simplificada (1 sub-bacia), usando dados de precipitação obtidos por pluviógrafos.

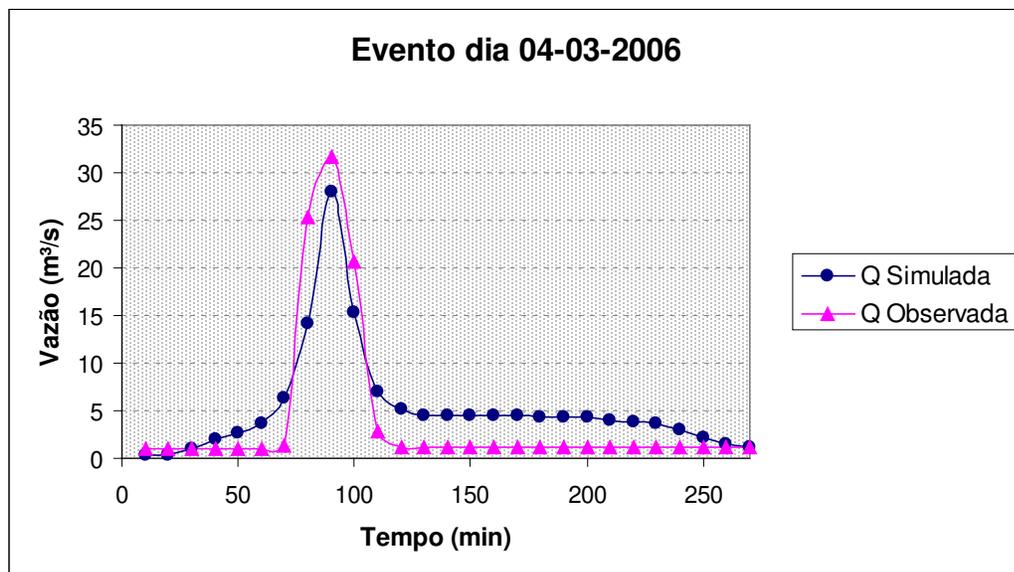


Figura 5.22: Evento do dia 04-03-2006, para discretização simplificada (1 sub-bacia), usando dados de precipitação obtidos por pluviógrafos.

## 5.5.2 Análise dos parâmetros obtidos nas calibrações

Examinando os resultados obtidos nas calibrações dos eventos da bacia estudada, diversas observações podem ser verificadas para os parâmetros do modelo que simboliza os processos ocorridos no escoamento pluvial. A seguir, os parâmetros são discutidos para cada grau de discretização.

- **Coefficiente de rugosidade de *Manning* para as sub-bacias**

O coeficiente de rugosidade de *Manning* é um dos parâmetros que gera maior dúvida ao modelador quanto ao seu valor. Analisando a bibliografia, James *et al.* (2003), outorgam faixas de valores para este parâmetro, relacionado com o tipo e a cobertura do solo. O coeficiente de rugosidade de *Manning* é altamente variável, principalmente em áreas urbanas, onde a heterogeneidade da cobertura do solo dificulta a atribuição de um valor específico.

Os valores médios encontrados nas simulações para o coeficiente de rugosidade de *Manning* das áreas impermeáveis e permeáveis, respectivamente, foram 0,010 e 0,25 para a bacia com discretização detalhada (6 sub-bacias) e de 0,011 e 0,25 para a bacia com discretização simplificada (1 sub-bacia).

Os valores obtidos, para os coeficientes de rugosidade de *Manning*, mostraram-se dentro das faixas de valores encontrados por Zaghoul (1983), de 0,013 e 0,25 para as áreas impermeáveis e permeáveis, respectivamente. Selvalingam *et al.* (1987) obtiveram valores de 0,028 e 0,35 para as áreas impermeáveis e permeáveis, respectivamente. Garcia e Paiva (2005) encontraram valores médios de 0,023 e 0,33 para as áreas impermeáveis e permeáveis, respectivamente.

O parâmetro de rugosidade das sub-bacias apresenta grande importância na calibração do modelo, pois, este possui grande influência sobre a vazão de pico. Os valores baixos do coeficiente de rugosidade de *Manning* apresentam maior sensibilidade.

O coeficiente de rugosidade no canal não foi modificado pela discretização da bacia, pois tanto para a discretização detalhada quanto a simplificada foram obtidos os mesmos valores.

### • Armazenamento em depressões

O armazenamento em depressões está relacionado com as perdas iniciais ocorridas pela detenção da água sobre a superfície. Zaghoul (1983) obteve valores de 1,6 e 4,7 mm para o armazenamento nas áreas impermeáveis e permeáveis, respectivamente. Selvalingam *et al.* (1987) encontraram valores de 2,5 e 7,5 mm para o armazenamento nas áreas impermeáveis e permeáveis, respectivamente. Garcia e Paiva (2005) encontraram valores médios de 5,2 e 7,5 para as áreas impermeáveis e permeáveis, respectivamente. Os valores de armazenamento podem ser tratados como parâmetros de calibração e ajuste do volume escoado.

Os valores médios encontrados na calibração dos eventos para altura do armazenamento das áreas impermeáveis ( $d_i$ ) e permeáveis ( $d_p$ ) foram de 2,5 e 7,0 mm, respectivamente, para a discretização detalhada (6 sub-bacias), e para a discretização simplificada (1 sub-bacia), 2,4 e 7,4, para áreas impermeáveis ( $d_i$ ) e permeáveis ( $d_p$ ), respectivamente.

### • Parâmetros de infiltração

Os parâmetros de infiltração calibrados foram  $I_o$ ,  $I_b$  e a constante de decaimento  $k$ , imprescindíveis para a resolução da equação de Horton. O parâmetro  $I_o$ , que representa a infiltração máxima ou inicial, obteve valor constante de 25,4 mm/h, tanto para a bacia detalhada quanto para a simplificada, em virtude da impermeabilização do solo.

Musgrave (1955) apud James *et al.* (2003), não usou o modelo SWMM, ele fez testes isolados de infiltração. Observou que o parâmetro  $I_b$  pode estar relacionado com o tipo de solo existente na bacia e apresentou valores de  $I_b$  para solos de diferentes características hidrológicas: solos bem drenados, como a areia, e solos pobremente drenados, como os argilosos. Os valores obtidos por Musgrave foram de 11,4 e 1,17 mm/h, para solos bem drenados e solos pobremente drenados, respectivamente.

Os valores encontrados na calibração dos eventos para a bacia com discretização detalhada e simplificada para o parâmetro  $I_b$  foram de 2 mm/h, este valor determina o predomínio de solos pouco permeáveis e pode ser explicado pela característica do solo da bacia apresentada no item 4.1.2.

Zaghloul (1983) obteve valores para os parâmetros de infiltração de Horton de 76,2 mm/h e de 13,2 mm/h para a infiltração inicial ( $I_o$ ) e infiltração mínima ou final ( $I_b$ ) respectivamente, o parâmetro de decaimento de Horton foi de  $0,00115 \text{ s}^{-1}$ .

Para Selvalingam *et al.* (1987) os parâmetros de infiltração de Horton variaram de 50 a 70 mm/h e de 2,0 a 5,0 mm/h para a infiltração inicial ( $I_o$ ) e infiltração mínima ou final ( $I_b$ ) respectivamente, o parâmetro de decaimento de Horton variou entre  $0,00007$  e  $0,00112 \text{ s}^{-1}$ . Garcia e Paiva (2005) encontraram valores médios para os parâmetros de infiltração de Horton de 165 mm/h e de 4,3 mm/h para a infiltração inicial ( $I_o$ ) e infiltração mínima ou final ( $I_b$ ) respectivamente, o parâmetro de decaimento de Horton foi de  $0,00558 \text{ s}^{-1}$ .

#### • Verificação dos graus de discretização da bacia

Os dois graus de discretização simulados apresentaram bons resultados, representados pelos coeficientes de eficiência e de correlação, vistos nas tabelas 5.12 a 5.15.

Para a bacia com discretização simplificada (1 sub-bacia) foram encontrados aumentos na vazão de pico, para as condições de uso de dados de precipitação por pluviógrafos, se comparados a discretização detalhada (6 sub-bacias). Zaghloul (1983) também encontrou aumento para a vazão de pico em bacias com discretização menor, os valores do aumento foram da ordem de 10 a 20%.

O aumento na vazão de pico, para bacias com um menor grau de discretização, pode ser explicado pela diminuição do armazenamento presente nos canais da simulação. Para minimizar este efeito, na aplicação da discretização simplificada, o  $n$  de *Manning* das sub-bacias foi aumentado para provocar uma diminuição da vazão de pico. Os valores obtidos, para a largura do escoamento ( $W$ ) através da largura do retângulo equivalente das sub-bacias, foram considerados satisfatórios, pois, estes valores são obtidos das características da bacia, sendo de fácil determinação.

Torna-se importante ressaltar que a utilização da bacia simplificada para o modelo chuva-vazão apresentou bons valores para quantificação do volume escoado e vazão de pico, no exutório da bacia. Considerando que a bacia em estudo é uma bacia pequena e pelo fato de ser quase que totalmente impermeabilizada, não se observando assim, grandes alterações nas características físicas das sub-bacias na discretização detalhada quando comparada a

discretização simplificada da bacia. Dessa forma, no caso da bacia em estudo, a Ralph Stettinger, e parece ser o caso de bacias semelhantes com área quase totalmente impermeabilizada, é mais simples utilizar a discretização simplificada para as simulações de vazões e o resultado não perde em qualidade.

## 5.6 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

A análise de sensibilidade realizada para os principais parâmetros dos módulos *Runoff* e *Extran*, apresentada a seguir, procurou avaliar a influência dos principais parâmetros na vazão de pico e no volume escoado para o aplicativo SWMM. O principal objetivo desta análise foi verificar a influência dos parâmetros nos resultados das simulações.

### 5.6.1 Sensibilidade do módulo Runoff

Para o módulo *Runoff* os parâmetros que apresentaram maior sensibilidade, quando a vazão de pico é a variável dependente estudada, foram: porcentagem de área impermeável (AI), largura do escoamento das sub-bacias (W) e o coeficiente de rugosidade de *Manning* para as sub-bacias (n). Os parâmetros de infiltração (Io, Ib e k) e altura do armazenamento (d) não apresentaram grande influência sobre a vazão de pico. A Figura 5.23 mostra a influência dos parâmetros analisados do módulo *Runoff* para a vazão de pico como variável dependente.

Ao analisar a sensibilidade dos parâmetros, sendo o volume escoado a variável dependente, os parâmetros mais sensíveis tornam-se a porcentagem de área impermeável (AI), largura do escoamento das sub-bacias (W). Os demais parâmetros, rugosidade de *Manning* (n), altura do armazenamento (d) e infiltração (Io, Ib e k), não demonstraram influência significativa, pois não apresentam grande influência no balanço do volume escoado. A Figura 5.24 exibe a influência dos parâmetros analisados do módulo *Runoff* para o volume escoado como variável dependente.

O parâmetro que exibiu maior sensibilidade foi o que representa a porcentagem de área impermeável (AI). Este assumiu um comportamento, aproximadamente, linear, aumentando a vazão de pico e o volume escoado com o acréscimo da porcentagem de área impermeável.

Outro parâmetro bastante sensível primordialmente quando a vazão de pico é analisada é a largura da sub-bacia ( $W$ ). Apresentando maior sensibilidade para os valores menores de  $W$ , a vazão de pico e o volume escoado exibiram comportamento similar. Uma redução da largura da sub-bacia pode ocasionar um retardamento e atenuação do pico do hidrograma.

O coeficiente de rugosidade de *Manning* causa o decréscimo da vazão de pico e do volume escoado, quando seu valor é aumentado. Porém, mostra uma sensibilidade maior para a vazão de pico. Os valores baixos do coeficiente de rugosidade de *Manning* apresentam maior sensibilidade.

A variação da taxa de infiltração também foi analisada, indicando pouca sensibilidade tanto para a vazão de pico quanto para o volume escoado. A taxa de infiltração inicial, ou máxima, e a taxa de infiltração final, ou mínima e taxa de decaimento ( $k$ ) de Horton não possuem abrangência significativa em decorrência da quase total impermeabilização do solo.

O parâmetro  $d$ , que representa a altura de detenção para as áreas permeáveis e impermeáveis, exibiu uma sensibilidade maior para o volume escoado.

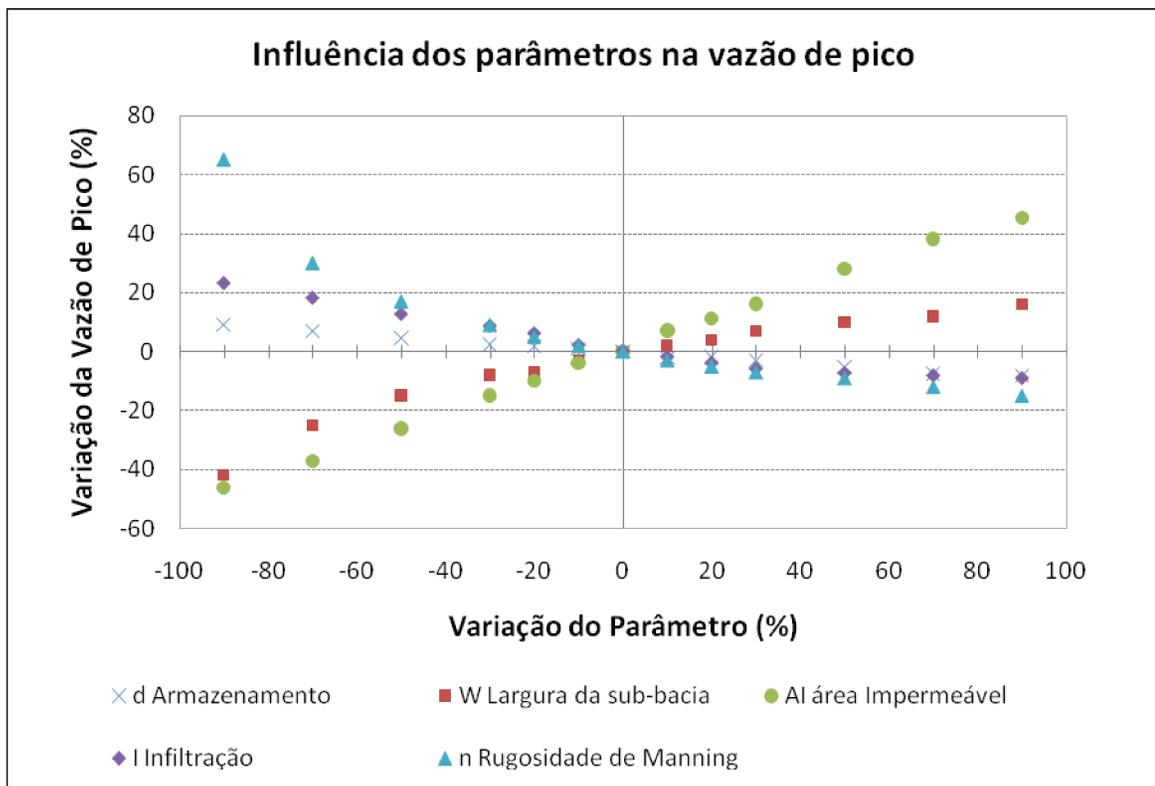


Figura 5.23: Influência dos parâmetros do módulo runoff na vazão de pico.

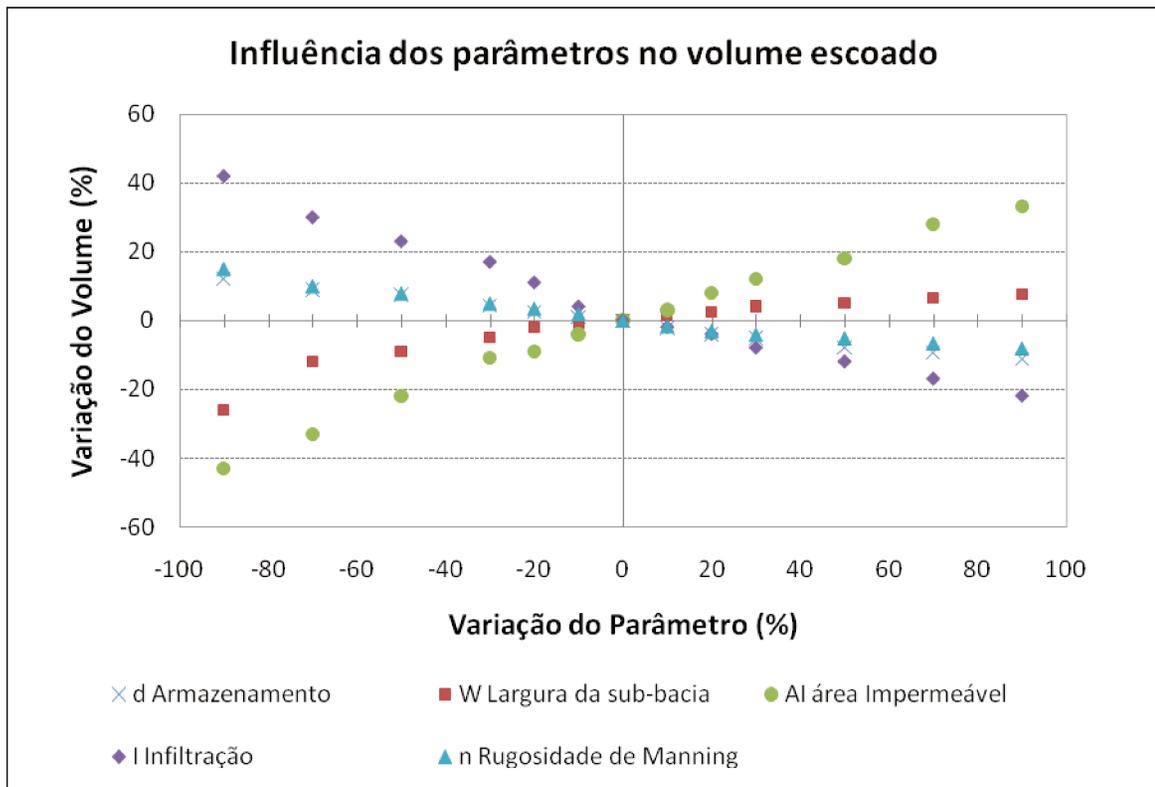


Figura 5.24: Influência dos parâmetros do módulo runoff no volume escoado.

### 5.6.2 Sensibilidade do módulo Extran

Para o módulo *Extran* o parâmetro que apresentou maior sensibilidade à vazão de pico foi o coeficiente de rugosidade de *Manning* ( $n$ ), tendo maior sensibilidade para os valores baixos de  $n$ .

O módulo *Extran* não ostentou grande influência para os parâmetros analisados, tendo o volume escoado como variável dependente. Contudo, é de grande valia ressaltar que as condições analisadas não incluíram condutos sob pressão, o que pode incitar mudanças significativas no volume escoado, em função da atenuação do pico da onda de cheia estimulado pelo armazenamento provocado pela escassez de capacidade de escoamento dos canais.

## 5.7 VALIDAÇÃO DO MODELO SWMM

### 5.7.1 Usando dados precipitação medidos por pluviógrafos

Após encontrar vários conjuntos de parâmetros que fossem capazes de representar cada evento, buscou-se encontrar um conjunto único de parâmetros que pudesse representar da melhor maneira possível todos os eventos, que podem ser visualizados nas Tabelas 5.17 e 5.18. Para obter estes parâmetros foram utilizados os dados de chuva obtidos com pluviógrafos e os dados de vazões observadas dos cinco primeiros eventos: 20/05/05, 24/01/06, 28/01/06, 21/02/06 e 04/03/06.

**Tabela 5.17: Parâmetros obtidos na calibração do modelo para bacia com discretização detalhada (6 sub-bacias).**

	ni	np	di (mm)	dp (mm)	lo (mm/h)	lb (mm/h)	k (l/s)	n conduto	R	E
<b>Bacia Detalhada</b>	<b>0,009</b>	<b>0,25</b>	<b>2,00</b>	<b>5,00</b>	<b>25,4</b>	<b>2,0</b>	<b>0,00115</b>	<b>0,013</b>	<b>0,94</b>	<b>0,87</b>

**Tabela 5.18: Parâmetros obtidos na calibração do modelo para bacia com discretização simplificada (1 sub-bacia).**

	ni	np	di (mm)	dp (mm)	lo (mm/h)	lb (mm/h)	k (l/s)	n conduto	R	E
<b>Bacia Simplificada</b>	<b>0,010</b>	<b>0,25</b>	<b>2,00</b>	<b>5,00</b>	<b>25,4</b>	<b>2,0</b>	<b>0,00115</b>	<b>0,013</b>	<b>0,94</b>	<b>0,88</b>

Dessa forma, o melhor conjunto de parâmetros encontrados no processo de calibração do modelo SWMM, usando dados de precipitação medidos por pluviógrafos, para bacia discretizada simplificada (1 sub-bacia) e para a bacia com discretização detalhada (6 sub-bacias), foi empregado para a validação da calibração. A validação ocorreu através de simulações de vazões na bacia Ralph Stettinger utilizando os dados de precipitação medidos por pluviógrafos. Para estas simulações foram selecionados quatro eventos, 01/11/06, 26/12/06, 27/12/06, 12/01/07, que não foram utilizados na calibração, respeitando-se o seguinte: sequência contínua dos dados dos pluviógrafos e a disponibilidade da série de vazão no posto da Praça Ralph Stettinger.

O modelo SWMM foi validado usando o melhor conjunto de parâmetros encontrados na calibração do modelo, por meio da aplicação destes parâmetros para simulação e utilizando como entrada no modelo os dados de precipitação medidos por pluviógrafos e os estimados por radar meteorológico.

Nas Figuras 5.25 a 5.32 são encontradas as vazões observadas e as simuladas para as precipitações medidas por pluviógrafos, para bacia com discretização detalhada (6 sub-bacias) e discretização simplificada (1 bacia), respectivamente. Em seguida são apresentados os resultados da validação da calibração usando dados de precipitação, provenientes de pluviógrafos, que podem ser visualizados na Tabela 5.19 e na Tabela 5.20.

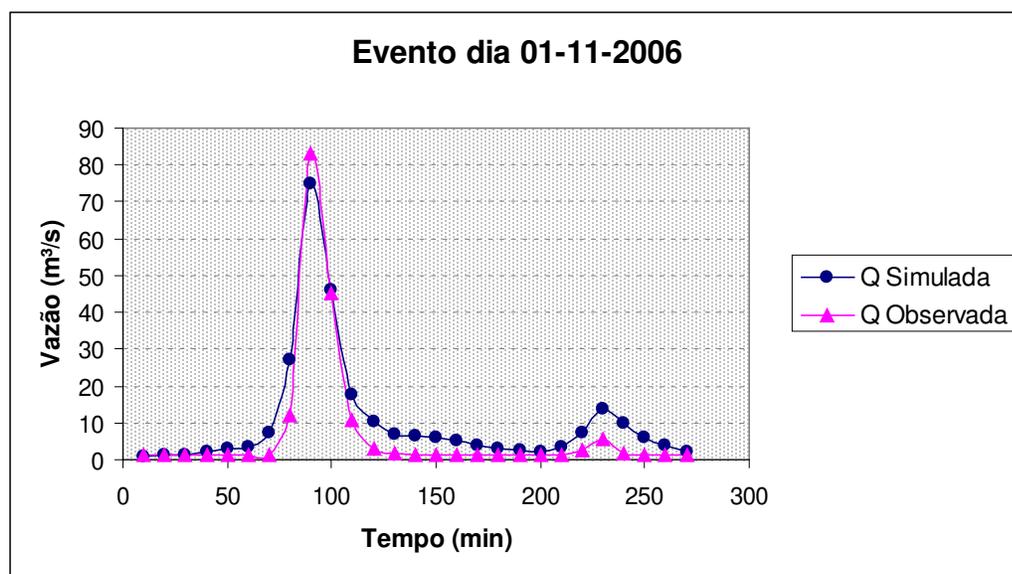


Figura 5.25: Evento do dia 01-11-2006, para discretização detalhada (6 sub-bacias), usando dados de precipitação obtidos por pluviógrafos.

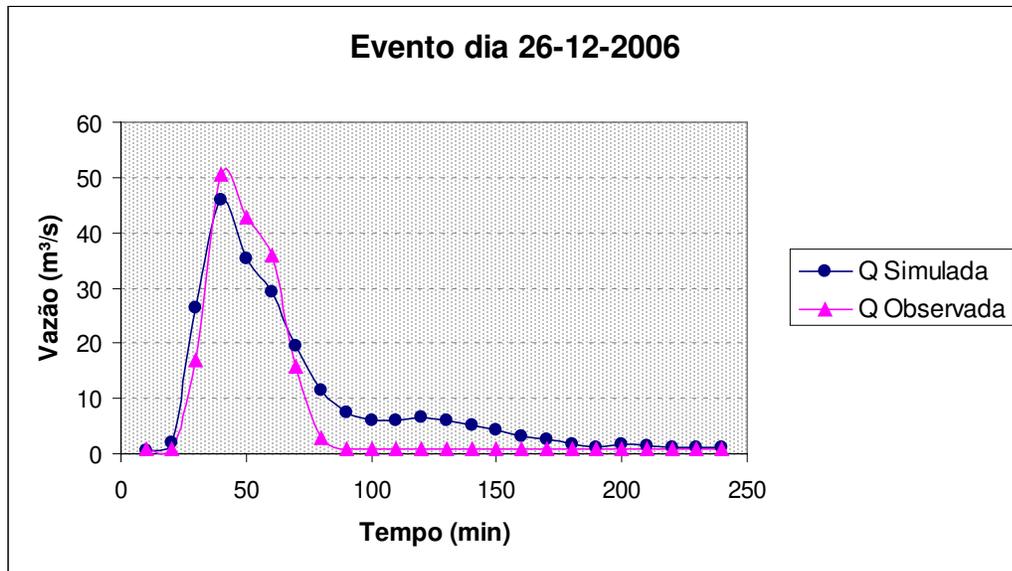


Figura 5.26: Evento do dia 26-12-2006, para discretização detalhada (6 sub-bacias), usando dados de precipitação obtidos por pluviógrafos.

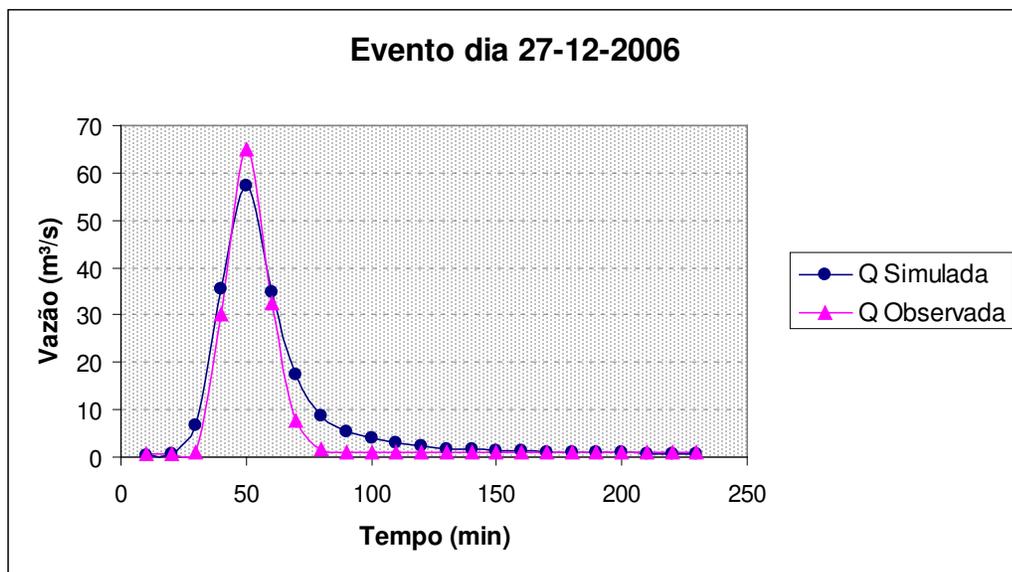


Figura 5.27: Evento do dia 27-12-2006, para discretização detalhada (6 sub-bacias), usando dados de precipitação obtidos por pluviógrafos.

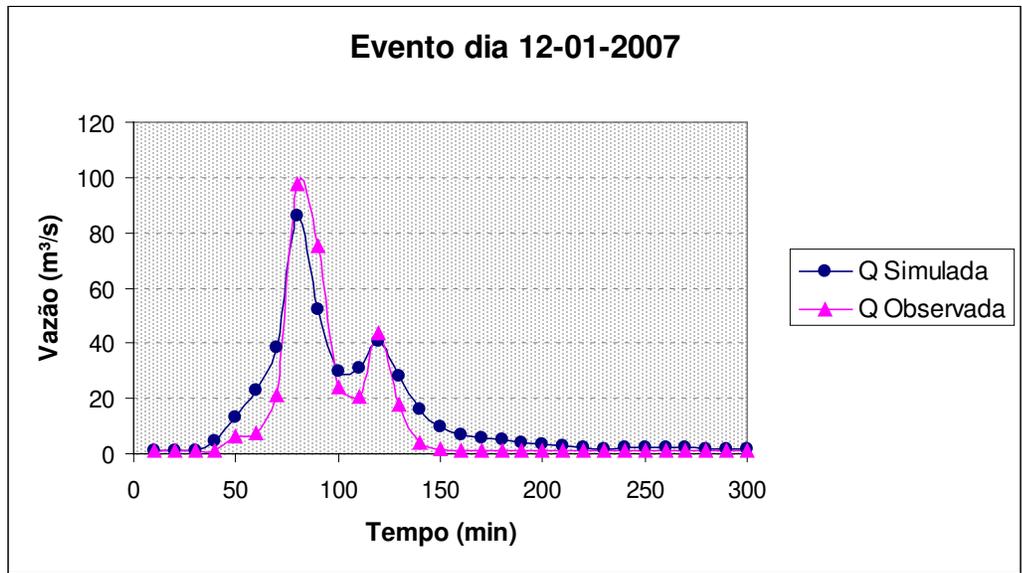


Figura 5.28: Evento do dia 12-01-2007, para discretização detalhada (6 sub-bacias), usando dados de precipitação obtidos por pluviógrafos.

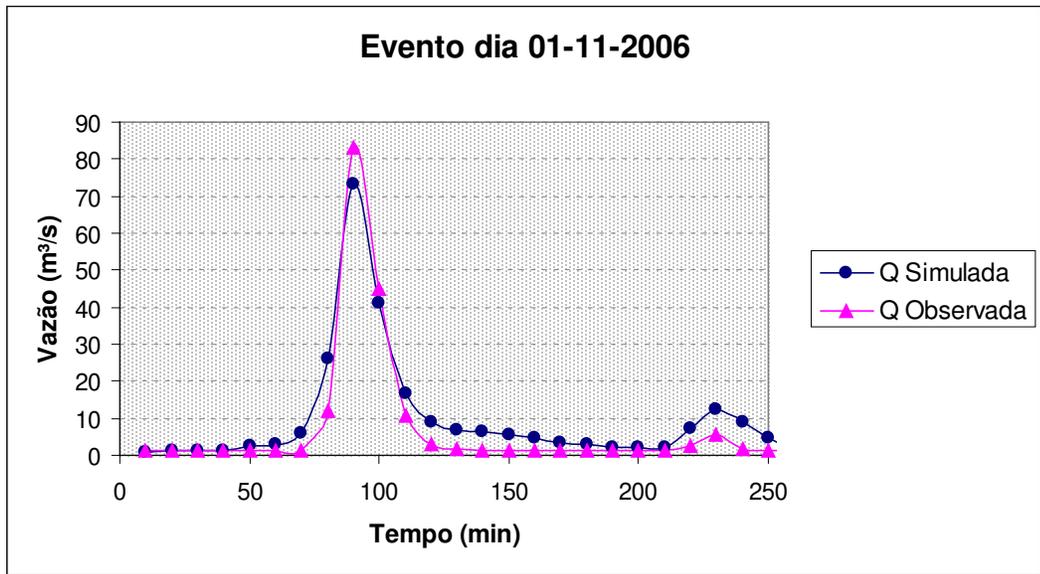


Figura 5.29: Evento do dia 01-11-2006, para discretização simplificada (1 sub-bacia), usando dados de precipitação obtidos por pluviógrafos.

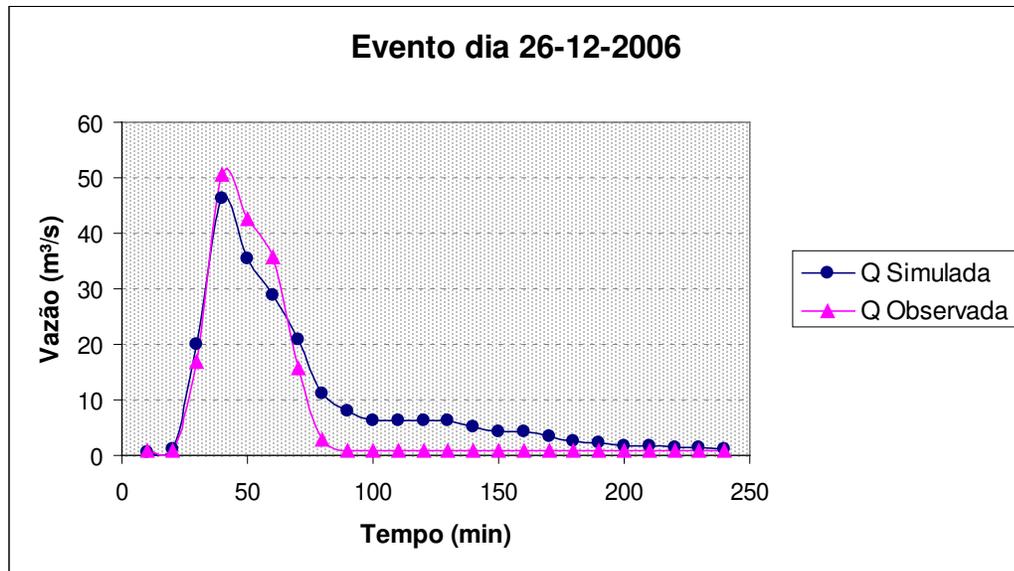


Figura 5.30: Evento do dia 26-12-2006, para discretização simplificada (1 sub-bacia), usando dados de precipitação obtidos por pluviógrafos.

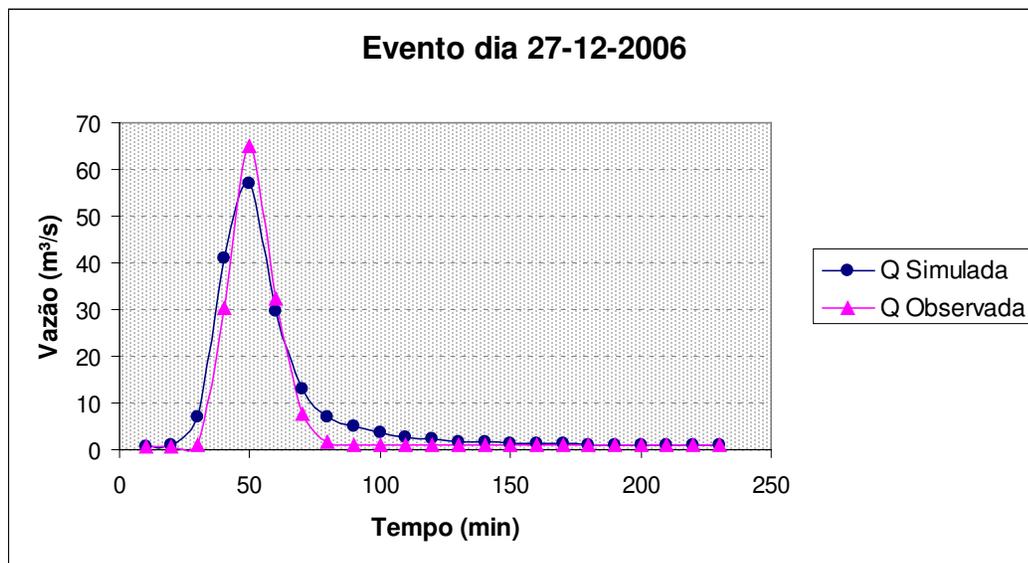


Figura 5.31 : Evento do dia 27-12-2006, para discretização simplificada (1 sub-bacia), usando dados de precipitação obtidos por pluviógrafos.

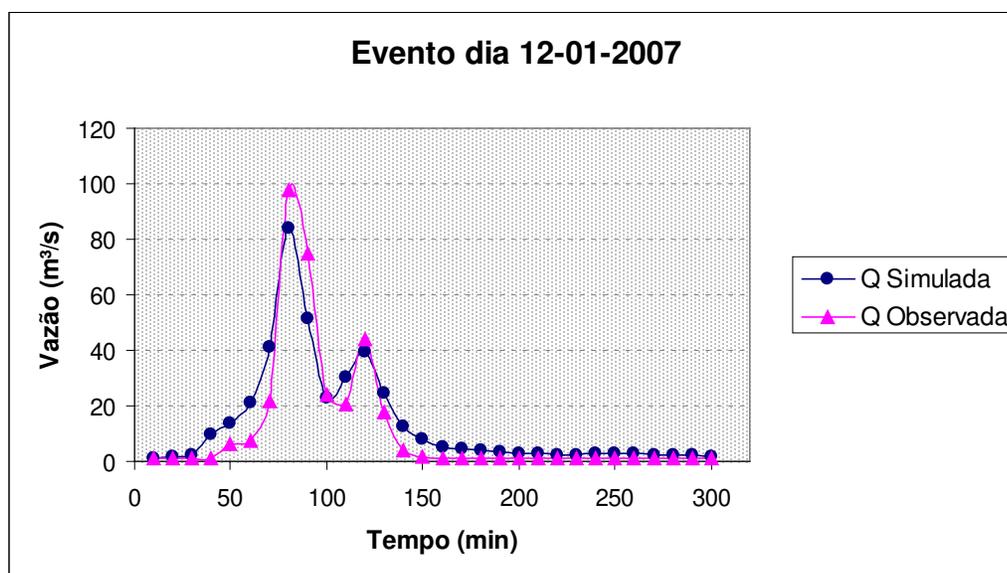


Figura 5.32: Evento do dia 12-01-2007, para discretização simplificada (1 sub-bacia), usando dados de precipitação obtidos por pluviógrafos.

Tabela 5.19: Resultados obtidos na simulação dos eventos, usando dados de pluviógrafos, para a bacia com discretização detalhada (6 sub-bacias).

Evento	Qp cal (m <sup>3</sup> /s)	Qp obs (m <sup>3</sup> /s)	Ves cal (m <sup>3</sup> )	Ves Obs (m <sup>3</sup> )	Qp cal/ Qp obs	Ves cal/ Ves obs	Erro no Qp (%)	Erro no Ves (%)	R	E
01/11/2006	74,47	83,05	4477680	3043170	0,90	1,47	10,33	47,14	0,94	0,88
26/12/2006	47,52	50,43	3300336	2585376	0,94	1,28	5,77	27,65	0,92	0,82
27/12/2006	57,27	64,97	2597298	2108502	0,88	1,23	11,85	23,18	0,93	0,87
12/01/2007	87,51	97,56	7567020	6214320	0,90	1,22	10,30	21,77	0,91	0,82
Média	-	-	-	-	-	-	9,56	29,94	0,93	0,85

Tabela 5.20: Resultados obtidos na simulação dos eventos, usando dados de pluviógrafos, para a bacia com discretização simplificada (1 sub-bacia).

Evento	Qp cal (m <sup>3</sup> /s)	Qp obs (m <sup>3</sup> /s)	Ves cal (m <sup>3</sup> )	Ves Obs (m <sup>3</sup> )	Qp cal/ Qp obs	Ves cal/ Ves obs	Erro no Qp (%)	Erro no Ves (%)	R	E
01/11/2006	73,27	83,05	4290084	3043170	0,88	1,41	11,78	40,97	0,94	0,86
26/12/2006	46,32	50,43	3249216	2585376	0,92	1,26	8,15	25,68	0,93	0,86
27/12/2006	57,22	64,97	2557002	2112090	0,88	1,21	11,93	21,07	0,91	0,85
12/01/2007	82,68	97,56	7337340	6214320	0,85	1,18	15,25	18,07	0,91	0,84
Média	-	-	-	-	-	-	11,78	26,45	0,92	0,85

## 5.7.2 Usando dados de precipitação estimados pelo radar meteorológico

Para a validação da calibração utilizando dados de precipitação estimados pelo radar meteorológico, também foi empregado o melhor conjunto de parâmetros encontrados no processo de calibração do modelo SWMM, vistos nas Tabelas 5.17 e 5.18, usando dados de precipitação medidos por pluviógrafos, para bacia discretizada simplificada (1 sub-bacia) e para a bacia com discretização detalhada (6 sub-bacias). A validação ocorreu através de simulações de vazões na bacia Ralph Stettinger utilizando os dados de precipitação estimados por radar meteorológico. Para estas simulações foram selecionados quatro eventos, 01/11/06, 26/12/06, 27/12/06, 12/01/07, respeitando-se o seguinte: sequência contínua dos dados do radar meteorológico e a disponibilidade da série de vazão no posto da Praça Ralph Stettinger.

Nas Figuras 5.33 a 5.40 são encontradas as vazões observadas e as simuladas para as precipitações estimadas por radar meteorológico, para bacia com discretização detalhada (6 sub-bacias) e discretização simplificada (1 bacia), respectivamente. Em seguida são apresentados os resultados da validação da calibração utilizando dados de precipitação, oriundos de radar meteorológico, que podem ser visualizados na Tabela 5.21 e na Tabela 5.22. Os eventos considerados para validação da calibração, estimados pelo radar meteorológico, foram: 01/11/06, 26/12/06, 27/12/06, 12/01/07.

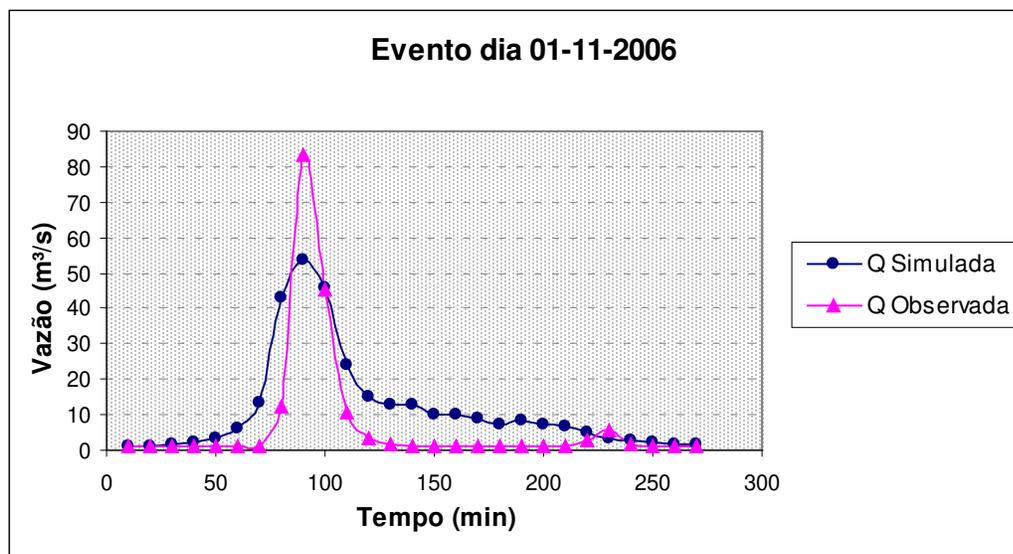


Figura 5.33: Evento do dia 01-11-2006, para discretização detalhada (6 sub-bacias), usando dados de precipitação obtidos por radar meteorológico.

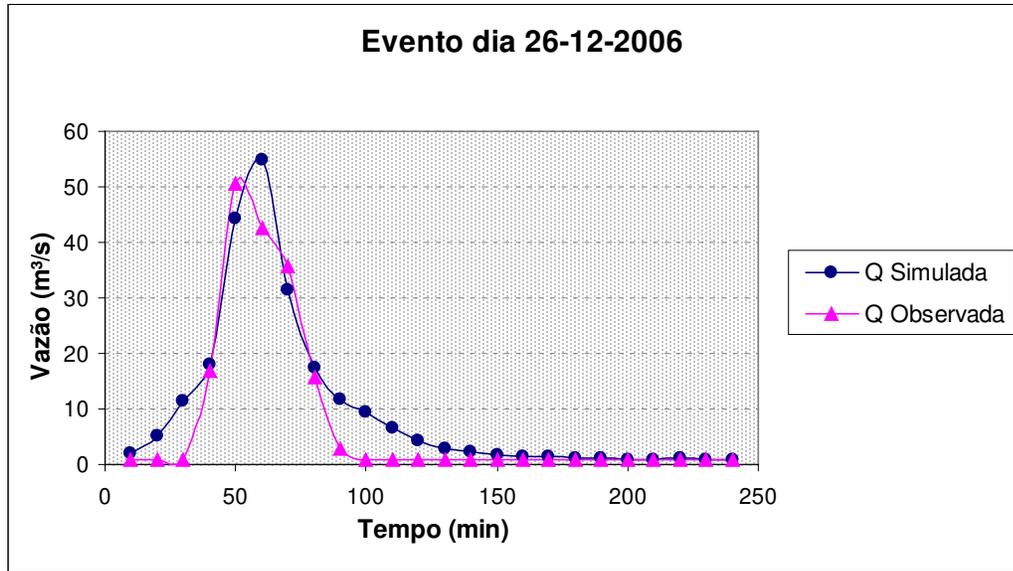


Figura 5.34: Evento do dia 26-12-2006, para discretização detalhada (6 sub-bacias), usando dados de precipitação obtidos por radar meteorológico.

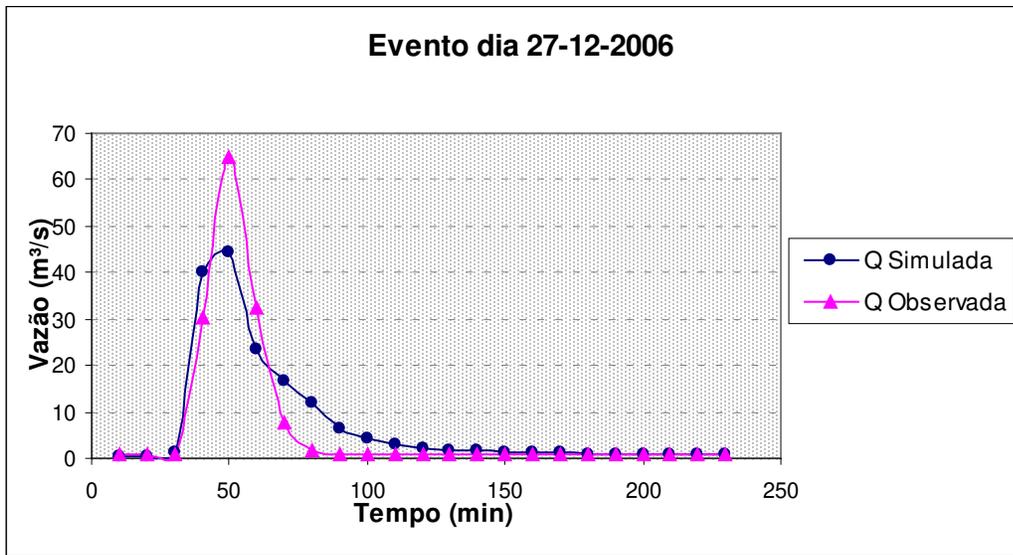


Figura 5.35: Evento do dia 27-12-2006, para discretização detalhada (6 sub-bacias), usando dados de precipitação obtidos por radar meteorológico.

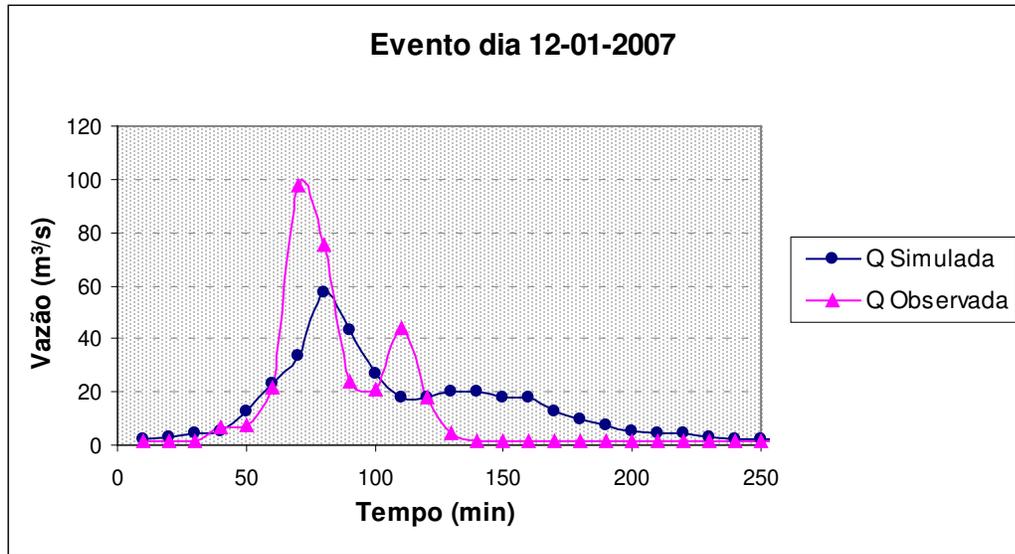


Figura 5.36: Evento do dia 12-01-2007, para discretização detalhada (6 sub-bacias), usando dados de precipitação obtidos por radar meteorológico.

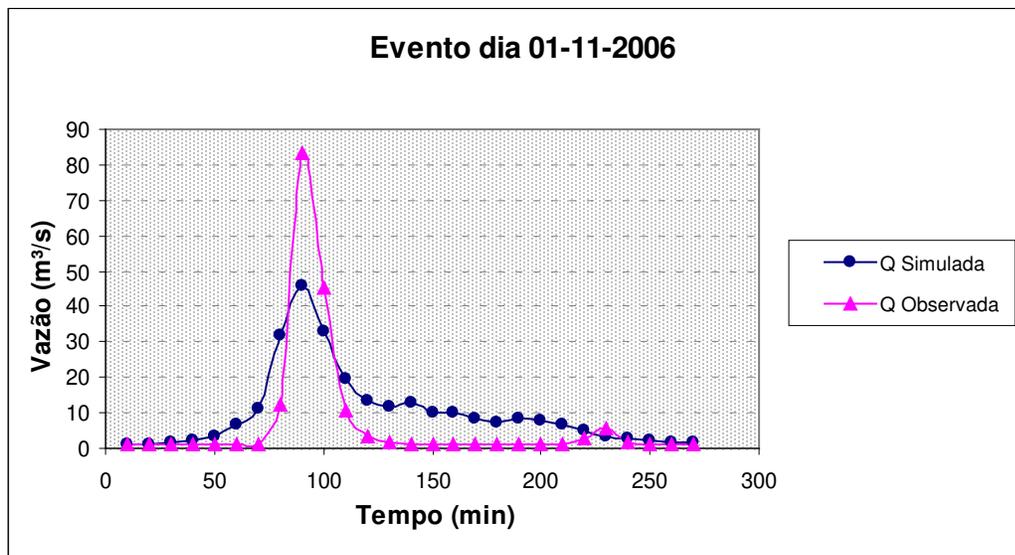


Figura 5.37: Evento do dia 01-11-2006, para discretização simplificada (1 sub-bacia), usando dados de precipitação obtidos por radar meteorológico.

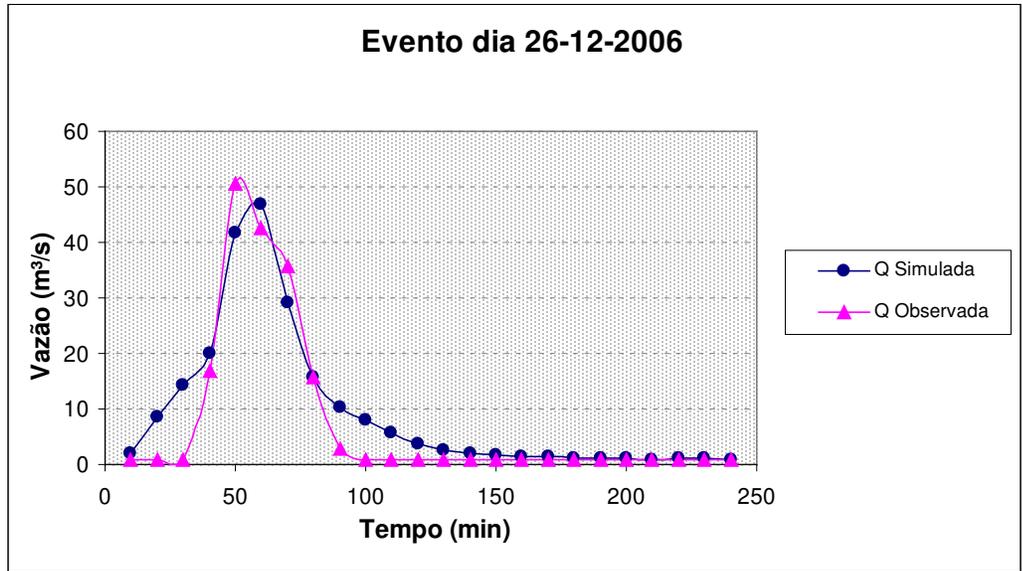


Figura 5.38: Evento do dia 26-12-2006, para discretização simplificada (1 sub-bacia), usando dados de precipitação obtidos por radar meteorológico.

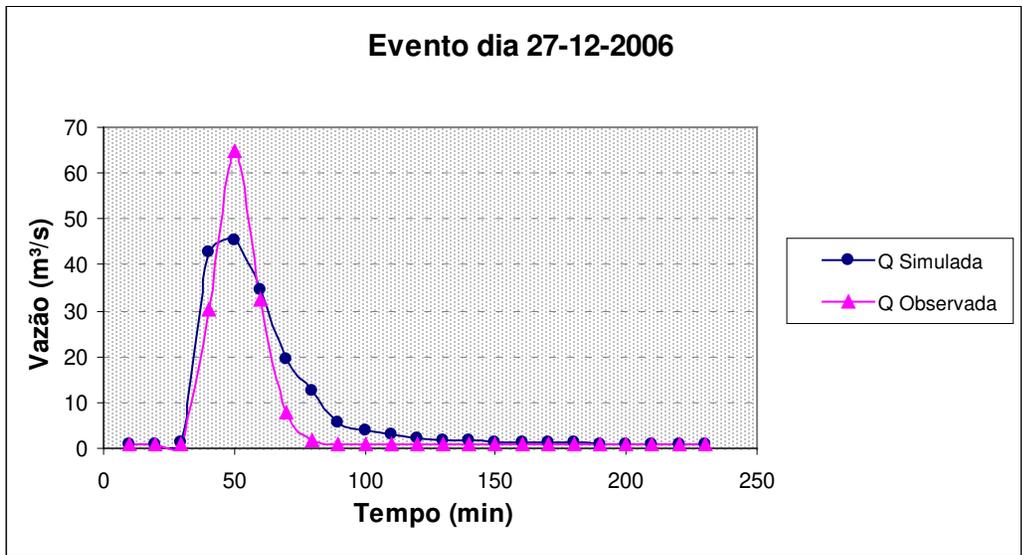


Figura 5.39: Evento do dia 27-12-2006, para discretização simplificada (1 sub-bacia), usando dados de precipitação obtidos por radar meteorológico.

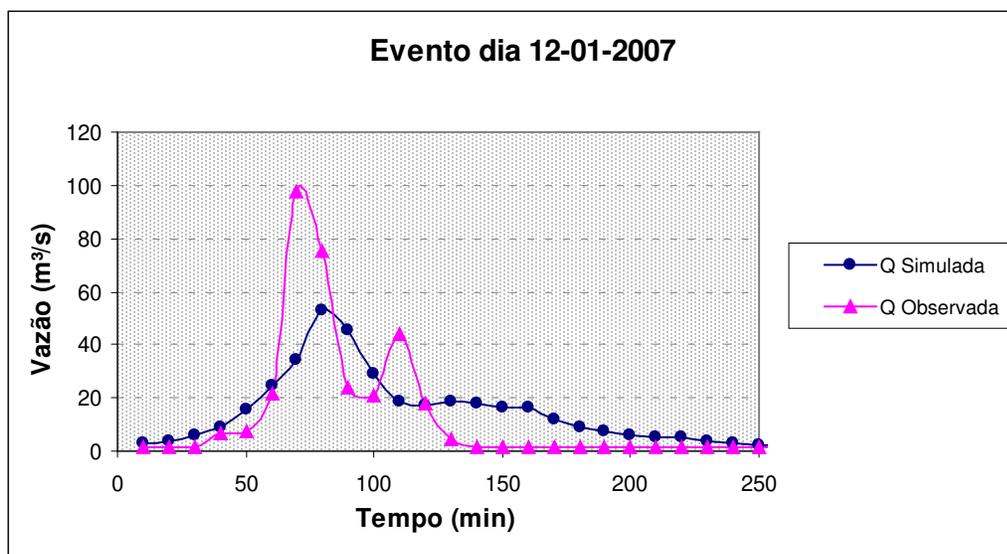


Figura 5.40: Evento do dia 12-01-2007, para discretização simplificada (1 sub-bacia), usando dados de precipitação obtidos por radar meteorológico.

Tabela 5.21: Resultados obtidos na simulação dos eventos, usando dados de radar, para a bacia com discretização detalhada (6 sub-bacias).

Evento	Qp cal (m <sup>3</sup> /s)	Qp obs (m <sup>3</sup> /s)	Ves cal (m <sup>3</sup> )	Ves Obs (m <sup>3</sup> )	Qp cal/ Qp obs	Ves cal/ Ves obs	Erro no Qp (%)	Erro no Ves (%)	R	E
01/11/2006	53,59	83,05	5036418	3043170	0,65	1,65	35,47	65,50	0,81	0,64
26/12/2006	54,86	50,43	3348288	2585952	1,09	1,29	8,78	29,48	0,92	0,83
27/12/2006	44,48	64,97	2315640	2108502	0,68	1,10	31,54	9,82	0,88	0,78
12/01/2007	57,54	97,56	6886620	6213240	0,59	1,11	41,02	10,84	0,73	0,51
<b>Média</b>	-	-	-	-	-	-	<b>29,20</b>	<b>28,91</b>	<b>0,83</b>	<b>0,69</b>

Tabela 5.22: Resultados obtidos na simulação dos eventos, usando dados de radar, para a bacia com discretização simplificada (1sub-bacia).

Evento	Qp cal (m <sup>3</sup> /s)	Qp obs (m <sup>3</sup> /s)	Ves cal (m <sup>3</sup> )	Ves Obs (m <sup>3</sup> )	Qp cal/ Qp obs	Ves cal/ Ves obs	Erro no Qp (%)	Erro no Ves (%)	R	E
01/11/2006	46,08	83,05	4392468	3043170	0,55	1,44	44,52	44,34	0,82	0,63
26/12/2006	46,74	50,43	3191904	2585952	0,93	1,23	7,32	23,43	0,91	0,83
27/12/2006	45,37	64,97	2552724	2108502	0,70	1,21	30,17	21,07	0,88	0,78
12/01/2007	53,10	97,56	7010280	6213240	0,54	1,13	45,57	12,83	0,72	0,50
<b>Média</b>	-	-	-	-	-	-	<b>31,89</b>	<b>25,42</b>	<b>0,83</b>	<b>0,68</b>

Os resultados obtidos pelos hidrogramas observados em relação aos hidrogramas calculados foram bons para os dados de precipitação medidos por pluviógrafos, pois o modelo

reproduziu bem os valores das vazões calculadas quando comparadas as observadas, apresentando um coeficiente de eficiência (E) de 0,85 e coeficiente de correlação (R) médio de 0,93. Garcia e Paiva (2005), em seus estudos, obtiveram um coeficiente de correlação médio de 0,96.

Entretanto, os resultados obtidos pelos hidrogramas observados em relação aos hidrogramas calculados foram considerados satisfatórios para os dados de precipitação estimados por radar meteorológico, apresentando um coeficiente de eficiência (E) médio de 0,69 e coeficiente de correlação (R) médio de 0,83. O resultado obtido foi decorrente da precipitação total estimada pelo radar meteorológico que subestimou em aproximadamente 28% quando comparada a medida pelos pluviógrafos e não devido ao uso do modelo SWMM.

Calheiros e Murakami (1983) usaram dados de precipitação estimados por radar meteorológico na simulação hidrológica de um trecho na bacia do Médio Tietê. Os autores compararam as curvas de vazão observada com a simulada e notaram que a hidrógrafa simulada reproduziu com fidelidade razoável a hidrógrafa real, subestimando os maiores picos de vazão ocorridos. Os resultados obtidos da simulação foram considerados aceitáveis na prática.

Moreira (2005) analisou o impacto de diferentes formas de medida da precipitação em saídas de modelos chuva-vazão, utilizando medidas de pluviômetros e estimativas de precipitação por radar meteorológico. Os resultados indicaram que as medidas de pluviômetros apresentam bons resultados para eventos de precipitação, porém, as simulações hidrológicas com precipitação estimada pelo radar meteorológico não apresentaram resultados satisfatórios, ora subestimando ou superestimando a vazão.

Embora os resultados obtidos com dados de precipitação estimados por radar meteorológico terem sido satisfatórios, porém, se tratando de uma bacia desse porte e dotada de uma densa rede de pluviógrafos, conclui-se que o uso de dados de precipitação medidos por pluviógrafos possui melhor acúrcia comparados aos dados estimados por radar meteorológico.

Todavia, todo e qualquer tipo de instrumento que mede ou estima variáveis meteorológicas apresentam algum tipo de erro, sejam erros de representatividade, erros de calibração, erros de natureza do equipamento, entre outros. Porém, o que se tem que buscar é uma diminuição destes erros, o que pode ser alcançado por meio da integração destes diversos tipos de sensores, aplicando para isso técnicas robustas e confiáveis, que sejam capazes de corresponder às expectativas no tratamento dessas informações.



## **6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES**

---

O presente estudo teve por objetivo avaliar a distribuição espacial da chuva utilizando estimativas de radar meteorológico e medidas de pluviógrafos como entrada do modelo hidrológico, o SWMM, para a bacia urbana Ralph Stettinger, pertencente à bacia do Ribeirão das Anhumas, em Campinas-SP. Foi feita a calibração dos eventos de cheia com a análise dos parâmetros envolvidos na simulação. As análises foram realizadas mediante monitoramento hidrológico, dados de radar meteorológico, levantamento das características físicas da bacia e processo de urbanização.

Para todos os eventos estudados os dados de precipitação estimados pelo radar meteorológico mostraram um desempenho satisfatório, porque subestimou em média cerca de 28%, os valores de precipitações e conseqüentemente as vazões. Fato este que pode estar associado à utilização de uma única equação ZR “padrão”, a equação (3.2) de Marshall e Palmer para a conversão da taxa de refletividade do radar em intensidade de precipitação, pois os parâmetros dessa relação podem variar de acordo com o tipo de chuva. Além disso, ecos de terreno, calibração eletrônica e efeitos da distância ao radar também podem corroborar para esse resultado. Com isso chega-se a conclusão de que os dados de precipitação estimados pelo radar meteorológico forneceram bons resultados quando foram levados em consideração os valores acumulados de precipitação e vazão, porém quando se considerou a distribuição espacial e temporal obtida com os dados de radar eles diferiram muito dos dados de precipitação medidos por pluviógrafos, indicando discrepâncias bastante significativas. Dessa forma, fica claro que os melhores resultados ainda são os fornecidos pelos pluviógrafos.

Do monitoramento hidrológico realizado na bacia foram selecionados nove eventos para as simulações. Estes foram selecionados em função de eventos de alta intensidade que

provocaram inundações e da disponibilidade dos dados de chuva por pluviógrafos, por radar e hidrógrafa observada.

O modelo chuva-vazão SWMM (*Storm Water Management Model*) apresentou bons resultados na simulação dos eventos, através da calibração de seus parâmetros.

Os resultados gerados na calibração dos parâmetros, usando dados de vazão observada e de pluviógrafo, para os dois níveis de discretização aplicados, alcançaram bons ajustes, representados pelos coeficientes de eficiência e de correlação. Para a discretização detalhada, (6 sub-bacias), da bacia Ralph Stettinger foram obtidos coeficientes de eficiência (E) médio de 0,85 e de correlação (R) médio de 0,93 e erros médios, na vazão de pico e volume escoado, de 10,80% e 25,45%, respectivamente, para os eventos simulados. Na discretização simplificada da bacia Ralph Stettinger obtiveram-se os coeficientes de eficiência (E) médio de 0,83 e de correlação (R) médio de 0,92 e erros médios de 9,25% e 27,02%, para as respectivas variáveis. Como os resultados obtidos foram bem semelhantes, recomenda-se utilizar a discretização simplificada em função da sua simplicidade e também devido à homogeneidade da bacia, quase que totalmente impermeabilizada.

Na análise da sensibilidade do módulo *Runoff*, responsável pela geração do escoamento superficial, os parâmetros que apresentaram maior sensibilidade, quanto à vazão de pico foram: porcentagem de área impermeável (AI), largura do escoamento das sub-bacias (W) e o coeficiente de rugosidade de *Manning* para as sub-bacias (n). Os parâmetros de infiltração (I) e altura do armazenamento (d) não apresentaram grande influência sobre a vazão de pico.

Quanto ao volume escoado os parâmetros mais sensíveis foram: a porcentagem de área impermeável (AI) e a largura do escoamento das sub-bacias (w). Os demais parâmetros: rugosidade de *Manning* (n), altura do armazenamento (d) e a infiltração (I) não apresentaram influência significativa.

No módulo *Extran*, responsável pela propagação do escoamento nos condutos, estruturas especiais e canais, o parâmetro que apresentou maior influência na vazão de pico foi o coeficiente de rugosidade de *Manning* (n), tendo maior sensibilidade para valores baixos de (n).

Para a realização da validação das calibrações, na bacia Ralph Stettinger foi empregado o melhor conjunto de parâmetros encontrados no processo de calibração do modelo SWMM, que estão apresentados na Tabela 5.17 e na Tabela 5.18, usando dados de precipitação medidos por

pluviógrafos e por radar meteorológico, para bacia discretizada simplificada (1 sub-bacia) e para a bacia com discretização detalhada (6 sub-bacias).

Em relação aos resultados obtidos na validação da calibração, usando dados de precipitação medidos por pluviógrafos, para os dois níveis de discretização aplicados, alcançaram bons ajustes, representados pelos coeficientes de eficiência e de correlação. Para a discretização detalhada da bacia foram obtidos os coeficientes de eficiência (E) médio de 0,85 e de correlação (R) médio de 0,93 e erros médios, na vazão de pico e volume escoado, de 9,56% e 29,94%, respectivamente, para os eventos simulados. Na discretização simplificada da bacia obtiveram-se coeficientes de eficiência (E) médio de 0,85 e de correlação (R) médio de 0,92 e erros médios de 11,78% e 26,45%, para as respectivas variáveis.

Com relação aos testes de validação, usando dados de precipitação estimados por radar meteorológico, para os dois níveis de discretização aplicados, alcançaram ajustes satisfatórios. Para a discretização detalhada da bacia foram obtidos coeficientes de eficiência (E) médio de 0,69 e de correlação (R) médio de 0,83 e erros médios, na vazão de pico e volume escoado, de 29,20% e 28,91%, respectivamente, para os eventos simulados. Na discretização simplificada da bacia obtiveram-se coeficientes de eficiência (E) médio de 0,68 e de correlação (R) médio de 0,83 e erros médios de 31,89% e 25,42%, para as respectivas variáveis.

O presente trabalho poderá ser útil para aprimorar o desempenho de modelos hidrológicos e auxiliar os sistemas de alerta a enchentes. Podendo ainda aplicar a correção da chuva para outras áreas da cobertura do radar e, dessa forma, empregar essa informação quantitativa em modelos hidrológicos e, também, para diversas outras áreas, onde se mostrem grandes carências por informações de precipitação, com boa distribuição espacial e temporal.

Assim sendo, como recomendações para trabalhos futuros, sugere-se:

- Utilização de relações ZR diferentes para tipos diferentes de precipitação, ou até mesmo o aperfeiçoamento de uma relação ZR para a região;
- Efetuar a calibração do modelo SWMM utilizando dados de precipitação obtidos por radar meteorológico integrados com dados de pluviômetros/pluviógrafos;
- Estudar o deslocamento dos sistemas que originaram as precipitações sobre a bacia e seus reflexos nos hidrogramas.



## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

ANTONIO, M. de A.; Aquisição de dados de precipitação com radar meteorológico Doppler. **Boletim Climatológico** FCT/UNESP – Campus de Presidente Prudente, ano 01, nº 02, novembro, 1996.

ANTONIO, M. de A.; **Técnica de ajuste em tempo real das medidas de chuva com radar**. Tese de Doutorado, Faculdade de Ciências Agrônômicas da Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1998, 156 p.

ANTONIO, M. de A. e ANDRADE, J. P. M.; Inundações em São Carlos, SP: avaliação de chuvas com radar. **Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Florianópolis, Brasil, 21-26 abril 2007, INPE, p. 3255-3262.

ANTONIO, M. de A. e CALHEIROS, R. V.; Método estatístico para obtenção de relações Z-R Hidrológicas: uma verificação. **Revista Brasileira de Engenharia.: Caderno de Recursos Hídricos**, vol. 3, nº 3, p. 17-28, 1985.

AUSTIN, P. M.; Relation between measured radar reflectivity and surface rainfall. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 115, p.1053-1071, may, 1987.

BALASCIO, C.C.; PALMERI, D.J.; GAO, H.; Use of a Genetic Algorithm and Multi-Objective Programming for Calibration of a Hydrologic Model. **Transactions ASAE**, vol. 41, n. 3, p. 615-619, 1998.

BARGE, B L. *et al.*; Rainfall measurements by weather radar: applications to hydrology. **Water Resources. Research**. Vol. 15, n. 6, p. 1380-1386, dec, 1979.

BARTH, F. T.; *et al.*; **Modelos para o gerenciamento de recursos hídricos**. São Paulo: Nobel: ABRH, 1987.

BERNE, A.; DELRIEU, G.; CREUTIN, J.D.; OBLED. C; Temporal and spatial resolution of rainfall measurements required for urban hydrology. **Journal of Hydrology**, vol. 299, p. 166-179, 2004.

BOTTER, D.A.; Paula, G.A.; Leite, J.G.; Cordani, L.K. 1996. **Noções de estatística com apoio computacional**. Instituto de Matemática e Estatística - USP, São Paulo, 1996, 231 p.

BRASIL.; Ministério da Agricultura. Comissão Nacional de Coordenação do Programa Nacional de Microbacias Hidrográficas (PNHMH). Manual Operativo. Brasília: Ministério da Agricultura, 1987. p.60.

BRAGA JR., B. e MASSAMBANI, O.; Weather Radar Technology for Water Resources Management. In: **IRTCUD/ USP (University of Sao Paulo), Brazil and IHP-UNESCO** (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, 1997. Disponível em: <http://www.unesco.org.uy/phi/libros/radar/tapa.html>

CALHEIROS, R. V. e MURAKAMI, L.; Discretização da correção em distância da quantificação de chuva por radar hidrometeorológico: uma verificação. **Anais V Congresso Brasileiro de Hidrologia**, Blumenau, ABRH, vol 1, 577-584, 1983.

CALVETTI, L.; BENETI, C.; PEREIRA FILHO, A. J.; Integração do radar meteorológico doppler do Simepar e uma rede de pluviômetros para a estimativa da precipitação. In: **Anais XI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Belo Horizonte, Brasil, 05-10 abril 2003, INPE, p. 1137-1144.

CHOI, K. S., and BALL, J. E.; Estimation of Control Facilities for Urban Runoff Modelling by Using a Hydroinformatic System. **Proc. the Eighth International Conference on Urban Storm Drainage**. August 30 – September 3, 1999, Sydney, Australia. Edited by IB Joliffe and JE Ball. The Institution of Engineers Australia, The International Association for Hydraulic Research, and The International Association on Water Quality, p.1776, 1999.

CHORLEY, R. J. and P. HAGGETT (ed.). **Models in Geography**. London, Methuen, 1967. 816p.

CHORLEY, R. J. , **Modelos Físicos e de Informação em Geografia**. Rio de Janeiro, EDUSP, 1975, 252p.

CHRISTOFOLETTI, A.; **Modelagem de Sistemas Ambientais**. São Paulo: Edgard Blucher LTDA. 1999. 236p.

CORREIA, M. L.; A crise mundial da água e o papel da cooperação entre os países de língua oficial portuguesa na sua resolução. In: SIMPÓSIO DE HIDRAULICA E RECURSOS HÍDRICOS DOS PAÍSES DE LÍNGUA OFICIAL PORTUGUESA, 6, 2003, Cabo Verde, **Anais eletrônicos...** Cabo Verde, p.1-15. nov. 2003. Disponível em: < <http://www.aprh.pt> >. Acesso em 14 de novembro de 2006.

CREUTIN, J. D.; OBLED, C.; Objective analysis and mapping techniques for rainfall fields: An objective comparison. **Water Resources Research**, vol 18, n 2, p 413–431, 1982.

DI BELLO, R. C.; **Análise do comportamento da umidade do solo no modelo chuva-vazão SMAP II –versão com suavização hiperbólica, estudo de caso: região de Barreiras na bacia do rio grande - BA.** 2005. 225p. (Dissertação de mestrado em Ciências em Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia Civil - Universidade Federal do Rio de Janeiro, (COPPE/UFRJ). Rio de Janeiro, 2005.

EINFALT, Th.; JOHANN, G.; PFISTER, A.; On the spatial validity of the heavy point rainfall measurements. **Water Science Technology**, vol. 37, n. 11, p 21-28, 1998.

FERREIRA, L.; **Simulação hidrológica utilizando o modelo TOPMODEL em bacias rurais, estudo de caso na bacia do ribeirão dos Marins – seção monjolinho - SP.** 2004. 205p. (Tese de doutorado em Engenharia Agrícola). Faculdade de Engenharia Agrícola - Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2004.

GARCIA, J. I. B.; PAIVA, E. M. C. D.; BRITES, A. P. Z.; PAIVA, R. C. D.; **Avaliação da discretização em uma bacia hidrográfica urbana, através do modelo SWMM.** In: XXI Congresso Latinoamericano de Hidráulica, Asociación Internacional de Investigaciones e Ingeniería Hidráulica (AIHH), São Pedro, Brasil, Octubre 18-22, 2004.

GARCIA, J. I. B., **Monitoramento hidrológico e modelagem da drenagem urbana da bacia hidrográfica do Arroio Cancela.** 2005. 169 p. (Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, na área de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental)- Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria - RS, 2005.

GARCIA, J. I. B.; PAIVA, E. M. C. D.; Avaliação das cheias em bacia urbana com diferentes graus de impermeabilização. In: 7º SIMPÓSIO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS DOS PAÍSES DE LÍNGUA OFICIAL PORTUGUESA, 2005, Évora: APRH, 2005. **Anais eletrônicos...** Évora, p.14. mai/jun. 2005.

GOMES, A. M.; MASSAMBANI, O.; A distribuição espacial e a variabilidade da precipitação na bacia urbana do Alto Tietê. **Revista Brasileira de Engenharia**, p 559-576. Apresentado no V Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos, Blumenau – SC, 1983.

GONÇALVES, F. M.; BARROS, M. T. L. de; PALOS, J. C.; Utilização de radar meteorológico em hidrologia. In: XIV Congresso Brasileiro de Meteorologia, Florianópolis – SC, 2006.

HEIN, M.; **Espacialização de duas microbacias hidrográficas do Rio Piracicaba para Modelagem Hidrológica.** 2000. 291p. (Dissertação de mestrado em Engenharia Agrícola). Faculdade de Engenharia Agrícola - Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2000.

HSIEH, L.S., WANG, R.Y.; A Semi-distributed Parallel-type Linear Reservoir Rainfall-Runoff Model and its Application in Taiwan. **Journal of Hydrological Processes**, vol. 13, n. 8, p. 1247-1268, 1999.

HSU, M.H.; CHEN, S.H.; e CHANG, T.J.; Inundation Simulation for Urban Drainage Basin with Storm Sewer System. **Journal of Hydrology**, vol. 234, p.21-37, 2000.

HYDROCOMP; **Hydrologic Simulation Models: An Overview**. Apresenta texto na área de modelagem hidrológica e simulação. Disponível em: <<http://www.hydrocomp.com/simoverview.html>>, Acesso em: 18 dez 2006.

INSTITUTO GEOLÓGICO. **Subsídios do meio físico-geológico ao planejamento do município de Campinas (SP)**. São Paulo: Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo. Mapas de escala 1:50.000. 1993.

JAMES, W.; HUBER, W. C.; DICKINSON, R. E.; PITT, R. E.; JAMES, W. R. C.; ROSENER, L. A.; ALDRICH, J. A.; **User's Guide to SWMM**, publicado por CHI, Guelph, Ontario, Canada, 2003.

JOKSIMOVIC D.; HILL, C.; REILLY, G.; COMEAU, A.; TOUSIGNANT, E.; JOBIN, D.; Model Calibration of Large Urban Sewer System using Radar Precipitation Information, Chapter 11 In: **Practical Modeling of Urban Water Systems**, Monograph 11, Edited by W. James W. 199, CHI, Guelph, Canada, 2002.

LIMA, W.P.; **Importância das florestas para produção de água. Simpósio sobre Recuperação da Cobertura Florestal da Bacia do Rio Corumbataí**, 3 Piracicaba, IPEF/ESALQ, 2000.

MOREIRA, I. A.; **Modelagem hidrológica chuva-vazão com dados de radar e pluviômetros**. 2005. 96p. (Dissertação de mestrado em Engenharia Hidrológica). Faculdade de Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental - Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2005.

HUBER, W.C.; DICKINSON, R.E.; **Storm Water Management Model, Version 4: User's Manual**. EPA/600/3-88/001a (NTIS PB88-236641/AS). U.S. Environmental Protection Agency. Athens, Georgia, 1992.

MAKSIMOVIC, C.; General Overview of Urban Drainage Principles and Practice. **Urban Drainage in Specific Climates** (IHP-V-Technical Documents in Hydrology). Paris: UNESCO, vol.1, n.40, p.1-21, 2001.

MARSHALL, J. S., PALMER, McK. The distribution of raindrops with size. **Journal of Meteorology**, v.5, p. 165-166, 1948.

MOTA, J. L. O.; **Modelos Matemáticos y su Aplicacion al Manejo de Cuencas Hidrográficas**. In: CONGRESO NACIONAL DE IRRIGACION, Culiacán, Sinaloa, México, 1999. Disponível em: [http://www.imacmexico.org/ev\\_es.php?ID=9937\\_201&ID2=DO\\_TOPIC](http://www.imacmexico.org/ev_es.php?ID=9937_201&ID2=DO_TOPIC) Acesso em 03 jan 2007.

NASH, J.E., SUTCLIFFE, J.V. River flow forecasting through conceptual models: Part I: A discussion of principles. **Journal of Hydrology**. Vol. 10, p. 282–290. 1970.

OLIVEIRA, V. S.; **Integração SIG e modelos de simulação de áreas inundáveis: Bacia do rio Pararangaba**, 2003. 124p. (Dissertação de mestrado em Engenharia de Infraestrutura Aeronáutica). Instituto Tecnológico de Aeronáutica - ITA. São José dos Campos, 2003.

PEREIRA FILHO, A. J.; **Uso do radar meteorológico para previsão de chuva a curto prazo aplicado a previsão hidrológica em bacias urbanizadas**. Dissertação de Mestrado, Instituto Astronômico e Geofísico da Universidade de São Paulo, 1989. 150p.

PEREIRA FILHO, A. J.; CRAWFORD, K. C. e HARTZELL, C. L. – Improving WSR-88D hourly rainfall estimates. **Weather and Forecasting**, vol. 13, nº 4, p. 1016-1028, 1998.

PEREIRA FILHO, A. J.; **Estimativa e Previsão de Precipitação por meio de Redes de Superfície, Sensoriamento Remoto e Modelagem Numérica no Âmbito de um Sistema de Previsão Hidrometeorológica**. Tese de Livre Docente em Meteorologia, Departamento de Ciências Atmosféricas do Instituto Astronômico e Geofísico da Universidade de São Paulo, 2007. 177p.

ROESNER, L. A.; ALDRICH, J. A.; DICKINSON, R. E.; **Storm Water Management Model User's Manual version 4: EXTRAN ADDENDUM**. EPA/600/3-88/001b (NTIS PB88-236658/AS). U.S. Environmental Protection Agency. Athens, Geórgia, 1992.

ROSA, E. U.; **Desenvolvimento de procedimentos computacionais para integração de sistemas de informação geográfica com modelo hidrológico chuva-vazão em bacias urbanas**. 2002. 143p. (Dissertação de mestrado em Engenharia da Computação). Faculdade de Engenharia da Computação - Universidade Estadual do Rio de Janeiro, (UERJ). Rio de Janeiro, 2002.

ROSSMAN, L. A.; **Storm Water Management Model User's Manual Version 5.0** EPA/600/R-05/040. National Risk Management Research Laboratory, U.S. Environmental Protection Agency: Cincinnati, OH. 2005.

SELVALINGAM S.; LIONG S. Y.; MANOHARAN P. C.; Use of RORB and SWMM models to an urban catchment in Singapore. **Advances in Water Resources**, vol. 10, p. 78-86, 1987.

SEPLAMA – Secretaria de Planejamento, Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente de Campinas. Disponível em: <http://www.campinas.sp.gov.br/seplan/index.htm>. Acesso em 10 de março de 2007.

SHEN, J.; CHANG, J.; e GONG, N.; Fuzzy Stormnet: Fuzzy Neural Network for Flow Estimation in Sewer Systems During Wet Weather. Proc. Water Environ. **Fed. 72<sup>nd</sup> Annu. Conf. Exposition**, [CD-ROM], New Orleans, LA. 1999.

SILVA, D. D.; *et al.*; Escoamento Superficial para diferentes intensidades de chuva e porcentagens de cobertura num Podzólico- Vermelho Amarelo com preparo e cultivo em contornos. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal: Associação Brasileira de Engenharia Agrícola, v.21, n.1, p.12-22, jan. 2001.

SILVA, B.C.; **Previsão Hidroclimática de vazão para a bacia do Rio São Francisco**. Tese de Doutorado, IPH, UFRGS, 2005. Porto Alegre. p. 228.

SINGH, V.P.; **Hydrologic systems**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, N. J., 1988. 480p.

SIVAPALAN, M. *et al.*; In: IAHS (International Association of Hydrology Sciences) Decade on Predictions in Ungauged Basins (PUB), 2003–2012: Shaping an exciting future for the hydrological sciences. **Hydrological Sciences–Journal–des Sciences Hydrologiques**, 48(6), dezembro de 2003, p. 859-880.

SMITH, P.L. *et al.*; Derivation of an R-Z relationship by computer optimization and its use in measuring daily areal rainfall. **Proc. 16<sup>th</sup> Radar Meteorology Conference**. p. 461-466, 1975.

SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V.K.; FULTON, J.C.; Evaluation of maximum likelihood parameter estimation techniques for conceptual rainfall-runoff models: influence of calibration data variability and length of model credibility. **Water Resources Research**, vol. 19, n 1, p. 251-259, 1983.

TAVARES, P. R. L.; CASTRO, M. A. H.; Integração de sistemas de informações geográficas à modelagem hidrológica e hidráulica para simulação de cenários de inundação. In: 7º SIMPÓSIO DE HIDRÁULICA E RECURSOS HÍDRICOS DOS PAÍSES DE LÍNGUA OFICIAL PORTUGUESA, 2005, Évora: APRH, 2005. **Anais eletrônicos...** Évora, p.15. mai/jun. 2005. Disponível em: < <http://www.aprh.pt> >. Acesso em 3 de janeiro de 2007.

TORRES, R. B., COSTA, M. C., NOGUEIRA, F. P. e PEREZ Filho, A. (Coord) 2006.; **Recuperação ambiental, participação e poder público: Uma experiência em Campinas**. Relatório de Pesquisa (processo nº 01/02952-1). Disponível em: <http://www.iac.sp.gov.br/projetoanhumas/relatorio.htm>

TROCH, P.A.; PANICONI, C.; MCLAUGHLIN, D. Catchment-scale hydrological modeling and data assimilation. **Advances in Water Resources**. V.26, p.131-135. 2003.

TROVATI, L. R. e ANTONIO, M. de A.; A influência da variabilidade e a incerteza na medida da chuva por radar e pluviômetro na água disponível no solo. **Anais XIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto**, Florianópolis, Brasil, 21-26 abril 2007, INPE, p. 5035-5042.

TSIHRINTZIS, V.A., HAMID, R.; Runoff Quality Prediction from Small Urban Catchments Using SWMM. **Hydrological Processes**, vol. 12, n. 2, p. 311-329, 1998.

TUCCI, C. E. M.; Modelos Determinísticos. In: BARTH, F. T., *et al.*. **Modelos para Gerenciamento de Recursos Hídricos**. São Paulo: ed. Nobel: ABRH, 1987. p. 213-324.

TUCCI, C.E.M.; **Modelos hidrológicos**. Porto Alegre, Ed. Universidade UFRGS, 1998.

TUCCI, C.E.M.; **Hidrologia: ciência e aplicação** – 2ª edição - Porto Alegre: Editora da Universidade UFRGS: ABRH, 2001. 943p.

TUCCI, C. E. M.; **Impactos da variabilidade climática e uso do solo sobre os Recursos Hídricos**. Estudo preparado como contribuição da ANA – Agência Nacional de Águas para a Câmara Temática sobre Recursos Hídricos do Fórum Brasileiro de Mudanças Climáticas, maio, 2002. 150p.

TUCCI, C. E. M.; e BERTONI, J. C.; **Inundações Urbanas na América do Sul**. ABRH - Associação Brasileira de Recursos Hídricos. Porto Alegre, Brasil, jan/2003. p. 156.

TUNDISI, J. G.; **Ciclo hidrológico e gerenciamento integrado**. Ciência e Cultura, v.55, n.4, p.31-33, São Paulo, Out/dez 2003

VICENTINI, T. A.; **Análise do efeito da urbanização nas cheias urbanas : monitoramento de bacias experimentais**. 2000. 201p. (Tese de doutorado em Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia Civil - Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2000.

VILLANUEVA, A. O. N.; e TUCCI, C. E. M.; **Simulação de Alternativas de Controle Para Planos Diretores de Drenagem Urbana**. Em: Soluções para a Drenagem Urbana em Países da América Latina, SEMINÁRIO DE DRENAGEM URBANA DO MERCOSUL - V SEMINÁRIO NACIONAL DE DRENAGEM URBANA, Porto Alegre, 2001, Porto Alegre: Editora ABRH.

VILLELA, S. M.; MATTOS, M.; **Hidrologia aplicada**. São Paulo: McGraw-Hill, Berkeley, 245p. 1975.

XAVIER, T. M. B. S.; XAVIER, A. F. S.; SILVA DIAS, M. A. F.; Tendências da Pluviometria na Grande São Paulo e a Influência dos Processos de Urbanização e Industrialização. **Anais, VII Congresso Brasileiro de Meteorologia**, vol. 1, 220-224. 1992.

XAVIER, T. M. B. S.; XAVIER, A. F. S.; SILVA DIAS, M. A. F.; Evolução da Precipitação Diária num Ambiente urbano: O Caso da Cidade de São Paulo. **Revista Brasileira de Meteorologia**, vol. 9, 44- 53. 1994.

WEGLARCZYK, S.; The interdependence and applicability of some statistical quality measures for hydrological model. **Journal of Hydrology**, vol. 206, p. 98-103, 1998.

WILSON, J. W. e BRANDES, E. A.; Radar measurements of rainfall-a summary. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 60, p.1048-1058, 1979.

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

ZAGHLOUL, N. A.; Sensitivity analysis of the SWMM Runoff-Transport parameters and the effects of catchment discretisation. **Advances in Water Resources**, vol. 6, p. 214-223, 1983.

ZOPPOU, C.; Review of Urban Storm Water Models. **Journal of Hydrology**, Elsevier Science, Austrália, p.195-231, 2001.



## A ANEXO A

---

### A.1 BLOCO RUNOFF

O bloco *Runoff* foi desenvolvido para simular a quantidade e a qualidade do escoamento gerado em áreas urbanas, e a propagação dos fluxos e dos contaminantes do esgotamento principal. Representa a bacia por um agregado de sub-bacias e canais ou condutos. O programa aceita um hietograma arbitrário da chuva ou da neve e, faz a simulação do degelo passo a passo, perdas por infiltração na área permeável, detenção superficial, escoamento superficial e em canais que conduz ao cálculo de um número de entrada de hidrogramas e polutogramas. Este bloco pode simular períodos que variam de minutos a ano.

#### **Rainfall – Runoff routing (Propagação chuva-vazão)**

O bloco *Runoff* dá forma à origem da geração do fluxo dentro do SWMM, convertendo o excesso de chuva (chuva e/ou degelo menos infiltração e/ou evaporação) em escoamento na superfície e em canais. A sub-bacia é subdividida em três subáreas que simulam áreas impermeáveis, com e sem armazenamento nas depressões (detenção), e a área permeável com armazenamento nas depressões como apresentado na Figura A.1 e na Tabela A.1. A altura do armazenamento nas depressões é um parâmetro de entrada para as áreas impermeáveis de cada bacia. A área impermeável sem armazenamento nas depressões é especificada para todas as sub-bacias pelo parâmetro PCTZER (como uma porcentagem):

$$A_3 = \frac{PCTZER}{100}(A_1 + A_3) \quad (A.1)$$

Na qual:

PCTZER = Porcentagem das áreas impermeáveis sem armazenamento.

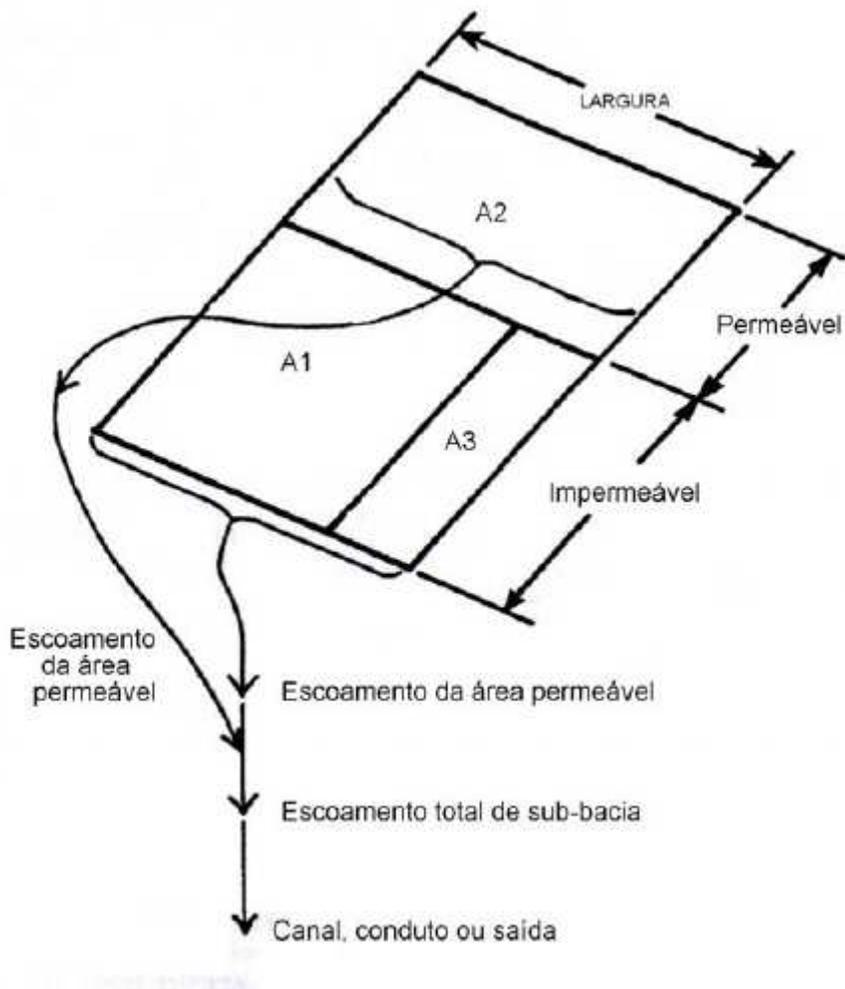


Figura A.1: Esquematização das Sub-bacias. Fonte: (HUBER e DICKINSON, 1992).

Tabela A.1: Classificação superficial da Sub-bacia. Fonte: (HUBER e DICKINSON, 1992).

Sub-área	Permeabilidade	Armazenamento nas depressões (detenção)
A1	Impermeável	Sim
A2	Permeável	Sim
A3	Impermeável	Não

O escoamento superficial é gerado de cada uma das três subáreas aproximando-as a um reservatório não-linear, como esboçado na Figura A.2, e representado pela combinação da equação da continuidade com a equação de *Manning*.

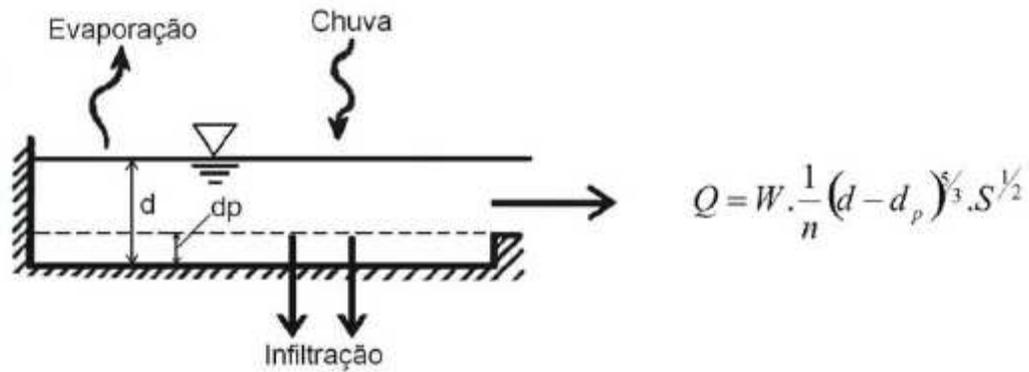


Figura A.2: Representação do reservatório não-linear da sub-bacia. Fonte: (HUBER e DICKINSON, 1992).

A equação da continuidade para as subáreas pode ser escrita como:

$$\frac{dV}{dt} = A \frac{dd}{dt} = A.i^* - Q \quad (\text{A.2})$$

Na qual:

$V = A.d$  = volume de água sobre a subárea ( $\text{m}^3$ );

$d$  = profundidade da água no reservatório (m);

$t$  = tempo (s);

$A$  = área superficial da sub-bacia ( $\text{m}^2$ );

$i^*$  = precipitação efetiva = chuva/neve menos evaporação/infiltração (mm/h);

$Q$  = vazão ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

A vazão é gerada usando a equação de *Manning* (3):

$$Q = W \frac{1}{n} (d - d_p)^{5/3} S^{1/2} \quad (\text{A.3})$$

Na qual:

$W$  = largura da sub-bacia (m);

$n$  = coeficiente de rugosidade de *Manning*;

$d_p$  = altura do armazenamento (m);

$S$  = declividade da sub-bacia (m/m);

Estas duas equações (A.2 e A.3) podem ser combinadas em uma equação diferencial não-linear que pode ser resolvida para valores de  $d$  desconhecidos. Assim é obtida a equação (A.4) do reservatório não-linear:

$$\frac{dd}{dt} = i^* - \frac{W \cdot S^{\frac{1}{2}}}{A \cdot n} (d - d_p)^{\frac{5}{3}} \quad (\text{A.4})$$

A equação (A.4) é resolvida em cada passo de tempo por meio de um esquema simples de diferença finita. O excesso de chuva é dado pelo programa como uma média no passo do tempo. A média dos fluxos de saída é calculada usando a média entre as alturas de armazenamento. Isto é, deixando às subscrições 1 e 2, representando o início e o final do passo de tempo, respectivamente, a equação (A.5) pode ser escrita como:

$$\frac{d_2 - d_1}{\Delta t} = i^* + WCON \cdot \left[ d_1 + \frac{1}{2}(d_2 - d_1) - d_p \right]^{\frac{5}{3}} \quad (\text{A.5})$$

Na qual:

$\Delta t$  = intervalo de tempo (s)

$$WCON = \frac{1 \cdot W \cdot S^{\frac{1}{2}}}{A \cdot n} \quad (\text{A.6})$$

A equação (A.5) é resolvida para  $d_2$ , usando o método iterativo de Newton-Raphson.

## A.2. INFILTRAÇÃO

A infiltração das áreas permeáveis, no modelo SWMM, podem ser calculadas pelas equações de Horton, Green-Ampt ou Curve Number. No estudo foi utilizado o modelo de Horton na determinação da infiltração. A equação de Horton calcula a capacidade de infiltração no solo como uma função no tempo:

$$I = I_b + (I_o - I_b)e^{-kt} \quad (\text{A.7})$$

Na qual:

I = capacidade de infiltração no solo (mm/h);

I<sub>b</sub> = taxa mínima de infiltração (mm/h);

I<sub>o</sub> = taxa de infiltração máxima ou inicial (mm/h);

t = tempo decorrido desde a saturação superficial do solo (s)

K = coeficiente de decaimento (s<sup>-1</sup>).

A infiltração é então relatada para o volume de água infiltrado, bem como para as condições de umidade da zona superficial do solo.

## A.3. BLOCO EXTRAN

A função específica do bloco *Extran* é propagar hidrogramas de entrada através das redes de tubulações, das junções, e das estruturas de desvios de fluxo do sistema de esgotamento principal aos interceptores e a entrada na estação de tratamento de água.

As equações diferenciais básicas utilizadas pelo modelo no cálculo do escoamento unidimensional não permanente gradualmente variado em canais abertos são conhecidas como as equações de Saint Venant. Estas são equações diferenciais às derivadas parciais, que permitem o cálculo do caudal e da altura da lâmina de água como funções do tempo e do espaço.

A equação da continuidade, que exprime a lei da conservação das massas, para escoamento não permanente tem como variáveis dependentes a vazão e a área superficial, e é representada pela equação (A.8):

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (\text{A.8})$$

Na qual:

A = área da seção transversal (m<sup>2</sup>);

Q = vazão no conduto (m<sup>3</sup>/s);

x = distância ao longo do tubo/canal (m); e

t = tempo (s).

Utilizando a vazão Q e a cota piezométrica H como variáveis dependentes, a equação do momento é escrita da seguinte forma:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(Q^2 / A)}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial x} + gAS_f = 0 \quad (\text{A.9})$$

Na qual:

g = aceleração gravitacional (m/s<sup>2</sup>);

H = z + h = cota piezométrica (m);

z = elevação inversa (m);

h = profundidade da água (m);

Sf = declividade da linha de energia (m/m).

O modulo *Extran* usa a equação do momento aplicada ao longo dos vínculos “links” e a equação da continuidade para os nós. Assim, o momento é conservado nas ligações e na continuidade nos nós. Para o uso em *Extran*, a equação do momento é combinada com as equações da continuidade, resultando uma equação (A.10) a ser resolvida ao longo de cada vínculo “link” em cada intervalo de tempo:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + gAS_f - 2V \frac{\partial A}{\partial t} - V^2 \frac{\partial A}{\partial x} + gA \frac{\partial H}{\partial x} = 0 \quad (\text{A.10})$$

Na qual:

$Q$  = descarga ao longo do conduto ( $\text{m}^3/\text{s}$ );

$V$  = velocidade no conduto ( $\text{m}/\text{s}$ );

$A$  = área da seção transversal do fluido ( $\text{m}^2$ );

$H$  = cota piezométrica (elevação inversa + profundidade da água) ( $\text{m}$ ); e

$S_f$  = declividade da linha de energia ( $\text{m}$ ).

A declividade da linha de energia é definida pela equação de *Manning* (A.11):

$$S_f = \frac{k}{gAR_h^{4/3}} Q|V| \quad (\text{A.11})$$

Na qual:

$k = g.n^2$ ;

$n$  = coeficiente de rugosidade de *Manning*;

$g$  = aceleração gravitacional ( $\text{m}/\text{s}^2$ );

$R_h$  = raio hidráulico ( $\text{m}$ ).

O uso da velocidade com valor absoluto assegura que a declividade da linha de energia sempre se oponha a direção do fluxo.

Substituindo a equação (A.11) na (A.10) e expressando na forma de diferença finita tem-se:

$$Q_{t+\Delta t} = Q_t - \frac{k\Delta t}{R_h^{4/3}} |\bar{V}_t| Q_{t+\Delta t} + 2\bar{V} \left( \frac{\Delta A}{\Delta t} \right)_t \Delta t + \bar{V}^2 \left[ \frac{A_2 - A_1}{L} \right] \Delta t - g \bar{A} \left[ \frac{H_2 - H_1}{L} \right] \Delta t \quad (\text{A.12})$$

Na qual:

$\Delta t$  = intervalo de tempo ( $\text{s}$ );

$L$  = comprimento do conduto ( $\text{m}$ ).

Resolvendo a equação (A.12) para  $Q_{t+\Delta t}$  dando a diferença finita final a forma da equação dinâmica do escoamento (A.13):

$$Q_{t+\Delta t} = \frac{1}{1 + \frac{k\Delta t}{R_h^{4/3}|V|}} \left[ Q_t + 2\bar{V} \left( \frac{\Delta A}{\Delta t} \right)_t \Delta t + \bar{V}^2 \left( \frac{A_2 - A_1}{L} \right) \Delta t - g \bar{A} \left( \frac{H_2 - H_1}{L} \right) \Delta t \right] \quad (\text{A.13})$$

Na equação (A.13),  $V$ ,  $R_h$ , e  $A$  as são médias ponderadas dos valores do conduto no tempo  $t$ , e  $(\Delta A/\Delta t)$  é a derivada no tempo para o intervalo de tempo anterior. As variáveis desconhecidas na equação (A.13) são  $Q_{t+\Delta t}$ ,  $H_2$  e  $H_1$ . As variáveis  $V$ ,  $R_h$ , e  $A$  podem ser relacionadas com  $Q$  e  $H$ . Consequentemente, uma outra equação é requerida relacionando  $Q$  e  $H$ . Esta pode ser obtida escrevendo a equação da continuidade aplicada aos nós:

$$\frac{\partial H}{\partial t_t} = \sum \frac{Q_t}{A_{st}} \quad (\text{A.14})$$

Ou, representada em diferenças finitas, temos a equação (A.15):

$$H_{t+\Delta t} = H_t + \sum \frac{Q_t \Delta t}{A_{st}} \quad (\text{A.15})$$

Na qual:

$A_s$  = área da superfície do nó ( $m^2$ ).

As equações (A.13 e A.15) podem ser resolvidas iterativamente para determinar a vazão em cada vínculo, e a altura (cota piezométrica), em cada nó, sobre o passo de tempo. A integração numérica destas duas equações é realizada pelo método de Euler modificado. Os resultados provaram ser relativamente exatos e, quando determinadas restrições são seguidas, estáveis. A Figura A.3 mostra como o processo trabalharia se somente a equação da vazão fosse envolvida.

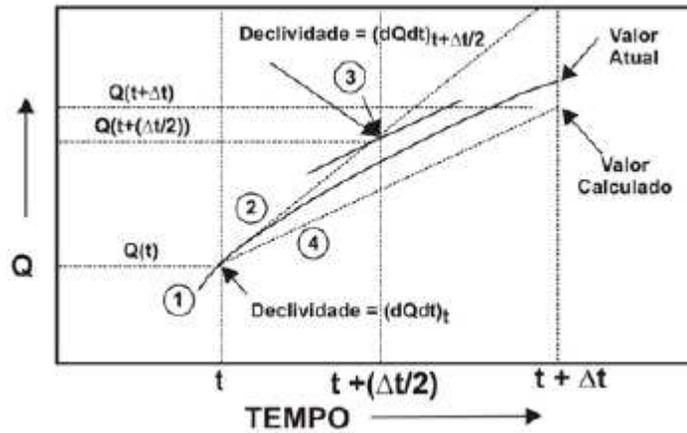


Figura A.3: Esquema computacional aproximado do método de Euler modificado para a vazão. Fonte: (HUBER e DICKINSON, 1992).

- 1) Cálculo de  $(dQ/dt)_t$  no sistema no tempo  $t$
- 2)  $Q(t + (\Delta t/2))$  como  $Q(t + (\Delta t/2)) = Q(t) + (dQ/dt)_t \cdot (\Delta t/2)$
- 3) a. Cálculo no sistema de  $t + (\Delta t/2)$   
 b. De  $(dQ/dt)_{t+\Delta t/2}$  para o sistema de tempo  $t + \Delta t/2$
- 4)  $Q(t + \Delta t)$  como  $Q(t + \Delta t) = Q(t) + (dQ/dt)_{t + \Delta t/2} \Delta t$

A primeira das três operações determina a declividade  $dQ/dt$ , valor da vazão na metade do passo de tempo. Ou seja, supõe-se que a declividade no tempo  $t + \Delta t/2$  é a declividade média durante o intervalo. O método é estendido facilmente a mais de uma equação, embora a representação gráfica seja muito difícil. Os cálculos correspondentes às cotas  $t + \Delta t/2$  e  $t + \Delta t$  são mostrados a seguir nas equações (A.16) e (A.17):

Metade do passo de tempo no nó  $j$ : time  $t + \Delta t/2$

$$H_j\left(t + \frac{\Delta t}{2}\right) = H_j(t) + \left(\frac{\Delta t}{2}\right) \frac{\left\{ \frac{1}{2} \sum \left[ Q(t) + Q\left(t + \frac{\Delta t}{2}\right) \right] + \sum \left[ Q\left(t + \frac{\Delta t}{2}\right) \right] \right\}}{A_{sj}(t)} \quad (\text{A.16})$$

Passo de tempo completo no nó j: Tempo t+Δt

$$H_j(t + \Delta t) = H_j(t) + (\Delta t) \frac{\overbrace{\left\{ \frac{1}{2} \sum [Q(t) + Q(t + \Delta t)] \right\}}^{\text{condutos e escoamento superficial}} + \overbrace{\sum [Q(t + \Delta t)]}^{\text{bombas, desvios de fluxo e entrada}}}{A_{sj}(t)} \quad (\text{A.17})$$

Nota-se que o cálculo da cota, na metade do passo de tempo, usa o cálculo da vazão da metade do passo de tempo, em todos os condutos conectados. Similarmente, o cálculo de todo o passo de tempo requer a vazão, no tempo t + Δt, para todos os condutos conectados. Em adição, as entradas e desvios de fluxo para cada nó por vertedores, orifícios e bombas devem ser calculados em cada metade e todo passo de tempo.

### Estabilidade numérica

#### ➤ Restrições no passo de tempo

O método de Euler modificado produz uma solução completamente explícita, na qual a equação do movimento é aplicada para escoamento em cada “*Link*” e a equação da continuidade para a cota em cada “*Nó*”, com uma ligação implícita durante o passo de tempo.

Os métodos explícitos envolvem regularmente aritmética simples e requerem pouco espaço de armazenamento, se comparados com os métodos implícitos. Entretanto, eles são menos estáveis e frequentemente, requerem passos de tempo muito curtos. O bloco *Extran* apresenta uma boa estabilidade numérica quando as seguintes desigualdades são satisfeitas:

#### ❖ Canais e Condutos

$$\Delta t \leq \frac{L}{(gD)^{1/2}} \quad (\text{A.18})$$

Na qual:

$\Delta t$  = passo de tempo (s);

L = comprimento do canal (m);

g = aceleração gravitacional (9,8 m/s<sup>2</sup>);

D = profundidade máxima do canal (m).

A equação (A.18) é reconhecida como a forma da condição de Courant, na qual o passo de tempo é limitado pelo tempo requerido pela onda dinâmica para propagar o comprimento de um conduto.

❖ Nós

$$\Delta t \leq \frac{C' A_s \Delta H_{m\acute{a}x}}{Q} \quad (\text{A.19})$$

Na qual:

C' = constante adimensional, aproximadamente igual a 0,1;

$\Delta H_{m\acute{a}x}$  = nível máximo da superfície d'água no passo de tempo (m);

$A_s$  = área da superfície líquida do nó (m<sup>2</sup>);

Q = vazão na entrada do nó (m<sup>3</sup>/s).

Examinando as desigualdades (A.18) e (A.19) releva que o máximo passo de tempo permissível  $\Delta t$ , será determinado pelo menor conduto que tenha elevada vazão de entrada. Caso pequenos passos de tempo sejam necessários, o usuário deverá eliminar ou agregar condutos ou canais menores. Na maioria das aplicações, intervalos de tempo de 15 a 30 segundos são adequados.

➤ Condutos equivalentes

Um conduto equivalente é a substituição computacional de um elemento atual, do sistema de drenagem, por um conduto imaginário, que é hidraulicamente idêntico. Usualmente, um conduto equivalente é usado quando se suspeita que a instabilidade numérica seja causada pelo elemento do sistema de drenagem.

Os condutos curtos são, frequentemente, causadores de problemas de instabilidade, e então ocasionalmente precisam ser substituídos por condutos equivalentes. Os orifícios não apresentam este problema, pois são automaticamente convertidos para condutos equivalentes pelo programa.

➤ Solução da equação do escoamento pelo método iterativo

A equação (A.12) é a base para a solução do método iterativo. Resolvendo a equação (A.12) para  $Q_{t+\Delta t}$  e usando coeficientes ponderados apropriados, a seguinte forma da diferença finita para a solução iterativa da equação dinâmica do escoamento é a equação (A.20) abaixo:

$$Q_{t+\Delta t} = \frac{\left\{ Q_t + (1-w) \left[ -g \bar{A} \left[ \left( \frac{H_2 - H_1}{L} \right) \Delta t + \frac{k \Delta t}{R_h^{4/3}} |V| + \left[ \left( \frac{Q}{A_2} - \frac{Q}{A_1} \right) / L \right] \Delta t \right] \right\}_t}{w \left[ \frac{k \Delta t}{R_h^{4/3}} |V| \right] + \left[ \left[ \left( \frac{Q}{A_2} - \frac{Q}{A_1} \right) / L \right] \Delta t \right]_{t+\Delta t}} + w \left( -g \bar{A} \left[ \left( \frac{H_2 - H_1}{L} \right) \Delta t \right]_{t+\Delta t} \right) + V \left( \frac{\Delta A}{\Delta t} \right) \quad (A.20)$$

Os valores de  $V$ ,  $R_h$ ,  $A$ , na equação (A.20), são médias ponderadas do início, meio e fim do conduto no tempo  $t$  e/ou  $t + \Delta t$ . Os valores no tempo  $t + \Delta t$  são valores para iteração atual. Na primeira iteração eles são iguais aos valores previstos no passo de tempo.  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $H_1$  e  $H_2$  representam a área da seção transversal e a altura do conduto nos nós de montante (1) e jusante (2).  $V(\Delta A/\Delta t)$  é a média da área do conduto, derivada no tempo, e a velocidade média do conduto base, na média ou diferença do passo de tempo antecedente e as iterações ocorridas. O valor do fator( $w$ ) da equação (A.20) é 0,55.

Os conhecimentos básicos na equação (A.20) são  $Q_{t+\Delta t}$ ,  $H_1$  e  $H_2$ . As variáveis  $R_h$ ,  $V$ ,  $A$ ,  $A_1$  e  $A_2$  podem ser relacionadas com  $Q$  e  $H$ . A equação relaciona  $Q$  e  $H$  com a equação da continuidade em um nó, para a solução iterativa.

$$\frac{\partial H}{\partial t_t} = \sum \frac{Q_t + Q_{t+\Delta t}}{A_{S_t} + A_{S_{t+\Delta t}}} \quad (A.21)$$

Na qual:

$A_{St}$  = área da superfície do nó no tempo  $t$  ( $m^2$ ); e

$A_{St + \Delta t}$  = área da superfície do nó no tempo  $t + \Delta t$  ( $m^2$ ).

As equações (A.20 e A.20) podem ser resolvidas iterativamente para determinar a vazão, em cada *link*, e a cota, em cada nó, no final de um passo de tempo  $t$ . A integração numérica dessas duas equações é realizada na solução de uma matriz iterativa sob-relaxação. Deve-se notar que a equação (A.10) tem sido linearizada pelo uso do produto de  $Q_{t+\Delta t}$  e  $(Q/A)t$  e usando a equação (A.11) para o termo  $S_f$ .

O método iterativo usa um fator de sob-relaxação de 0,75 para a primeira iteração e 0,5 para as iterações subsequentes. Assim, a nova estimativa de  $Q_{t+\Delta t}$  em cada iteração é:

$$Q_{t+\Delta t} = (1 - U_f) Q_j + U_f Q_{j+1} \quad (A.22)$$

Na qual:

$U_f$  = fator de sob-relaxação (0,75 ou 0,5);

$Q_j$  = vazão no conduto na iteração  $j$  ( $m^3/s$ );

$Q_{j+1}$  = vazão no conduto na iteração  $j+1$  ( $m^3/s$ ).

Similarmente, a estimativa da altura no nó em cada iteração é:

$$H_{t+\Delta t} = (1 - U_f) H_j + U_f H_{j+1} \quad (A.23)$$

Na qual:

$H_j$  = altura no nó na iteração  $j$  (m);

$H_{j+1}$  = altura no nó na iteração  $j+1$  (m).

A solução do novo passo de tempo é encontrada quando todas as estimativas dos escoamentos do conduto e cota piezométrica dos nós satisfazem o critério da convergência (o valor recomendado para o parâmetro de convergência é 0,0025). O critério de convergência para escoamento em condutos e altura em nó é:

$$\frac{|Q_{j+1} - Q_j|}{Q_{ful}} \leq SURTOL \quad (A.24)$$

$$\frac{|H_{j+1} - H_j|}{H_{crown}} \leq SURTOL \quad (A.25)$$

Na qual:

$Q_{full}$  = vazão de projeto no conduto (m<sup>3</sup>/s);

$H_{crown}$  = distância entre o fundo e o topo do nó (m).

A vazão de projeto, para condutos com declividade zero, é baseada em uma diferença assumida de 0,01 entre a cota de fundo montante e a de jusante.

O método iterativo usa um passo de tempo variável. O passo de tempo, especificado nos dados de entrada do modelo (DELT= comprimento do passo de tempo), é o máximo passo de tempo permitido para o programa usar durante a simulação. O programa selecionará o passo de tempo atual baseado no menor número de Courant dos condutos no início de cada passo de tempo. O modelo determina o número do menor comprimento de passo de tempo requerido igual a DELT.

O número de Courant para conduto é:

❖ Para condutos fechados:

$$C\# = \frac{L}{[V + (gD)^{1/2}]} \quad (A.26)$$

❖ Para canais abertos:

$$C\# = \frac{L}{V + \left(\frac{gA}{T}\right)^{1/2}} \quad (A.27)$$

Na qual:

$C\#$  = número de courant para o conduto (s);

$L$  = comprimento do canal (m);

$g$  = aceleração da gravidade (9,8 m/s<sup>2</sup>);

D = profundidade no conduto ou canal (m);

V = velocidade média no conduto ou canal (m/s);

A = área da seção transversal do conduto ou canal (m<sup>2</sup>);

T = largura do conduto ou canal (m).

Se o menor C# igualar ou exceder DELT o programa usará somente um pequeno passo de tempo. Se o menor número de Courant C# for menor que DELT o programa, então, calculará o número do menor passo de tempo requerido para igualar DELT.



## **B ANEXO B - CONVERSÃO DOS DADOS DE RADAR**

---

**Procedimento utilizado para transformação dos arquivos com dados de radar meteorológico (formato texto, separado por espaços (.txt)) para o formato “Comma Separated Values” (CSV) que pode ser importado para o excel.**

- (1) Criação de um UNIX Shell Script que tem por função substituir todos os espaços em brancos dos arquivos que foram enviados por caracteres que possam servir de delimitadores para os dados. O delimitador utilizado neste caso foi a vírgula (,).
- (2) Basicamente, durante a escrita do script foi utilizado a função “sed” do SO UNIX que tem por função pesquisar por “constantes” e realizar a substituição por outra sequência de caracteres.
  1. EX.: **sed 's/ /,/g' \$arquivo.mod.mod >\$arquivo.csv** (pesquisa por espaço em branco e substitue por “,”).
  2. EX. de execução do script: **sh <NOME DO SCRIPT> <DIRETORIO ONDE ESTAO OS ARQUIVOS .TXT> <DIRETORIOS ONDE SERAO CRIADOS OS ARQUIVOS .CSV>**
  3. Script que foi utilizado:

```
#!/bin/ksh
#
# CONVERSAO DOS ARQUIVOS .TXT COM OS DADOS DE RADAR PARA
# ARQUIVOS COM FORMATO CSV (COMMA SEPARATED VALUES)
#
# pegando a lista de todos os arquivos do diretório
# que foi passado como parâmetro em $1
cd $1
```

```

for arquivo in `ls -la *.txt|awk '{print $8}`
do

    echo "Arquivo $arquivo para $arquivo.csv"

    #procurando pelo padrao " " e substituindo por ,
    sed 's/ /,/g' $arquivo >$arquivo.mod

    #procurando pelo padrao " " e substituindo por ,
    sed 's/ /,/g' $arquivo.mod >$arquivo.mod.mod

    #procurando pelo padrao " " e substituindo por ,
    sed 's/ /,/g' $arquivo.mod.mod >$arquivo.csv

done

#remove os arquivos temporarios

rm -f *.txt.mod

rm -f *.txt.mod.mod

mkdir CSV_FILES

mv *.csv CSV_FILES/

chmod -R 777 CSV_FILES/

cd -

echo "Script terminado."

```

### **Procedimento utilizado para transformação dos arquivos gerados .csv para arquivos .xls (Planilhas prontas)**

- (1) Foi utilizado um script “perl” para transformação dos arquivos gerados anteriormente com extensão .CSV para arquivos com formato excel (.XLS)
  - (2) Este script utiliza-se do método “WriteExcel” disponível para SO`s baseados em UNIX.
1. Abaixo, encontra-se o script que foi utilizado:

```
#!/usr/bin/perl -w
```

```
#####
```

```

#
# Example of how to use the WriteExcel module
#
# Program to convert a CSV comma-separated value file into an Excel file.
# This is more or less an non-op since Excel can read CSV files.
# The program uses Text::CSV_XS to parse the CSV.
#
# Usage: csv2xls.pl file.csv newfile.xls
#
#

use strict;

use Spreadsheet::WriteExcel;
use Text::CSV_XS;

# Check for valid number of arguments
if (( $#ARGV < 1) || ( $#ARGV > 2) ) {
    die("Usage: csv2xls csvfile.txt newfile.xls\n");
    if expand("%") == ""|browse confirm w|else|confirm w|endif
};

# Open the Comma Separated Variable file
open (CSVFILE, $ARGV[0]) or die "$ARGV[0]: $!";

# Create a new Excel workbook
my $workbook = Spreadsheet::WriteExcel->new($ARGV[1]);
my $worksheet = $workbook->add_worksheet();

# Create a new CSV parsing object

```

```

my $csv = Text::CSV_XS->new;

# Row and column are zero indexed

my $row = 0;

while (<CSVFILE>) {
    if ($csv->parse($_)) {
        my @Fld = $csv->fields;

        my $col = 0;
        foreach my $token (@Fld) {
            $worksheet->write($row, $col, $token);
            $col++;
        }
        $row++;
    }
    else {
        my $err = $csv->error_input;
        print "Text::CSV_XS parse() failed on argument: ", $err, "\n";
    }
}

```

## C ANEXO C – EVENTOS MEDIDOS POR PLUVIÓGRAFOS

Os eventos foram selecionados de acordo com a disponibilidade conjunta dos dados de precipitação medidos pelos pluviógrafos e estimados pelo radar meteorológico e de vazão observada. Foram escolhidas as chuvas que apresentaram os maiores picos de vazão. Assim sendo, foram selecionados nove eventos: 20/06/05, 24/01/06, 28/01/06, 21/02/06, 04/03/06, 01/11/06, 26/12/06, 27/12/06, 12/01/07, cujos dados de precipitação que foram obtidos por meio de pluviógrafo, podem ser visualizados nas Tabelas C.1 a C.9, a seguir:

**Tabela C.1: Evento do dia 20/05/2005, obtido por medidas de pluviógrafos.**

Hora	Precipitação (mm) medida por pluviógrafos				MÉDIA de THIESEN
	Paranapanema	ETA	Sede	CBPO	
06:40	0,30	0,51	1,02	0,00	0,69
06:50	0,38	0,51	1,27	0,00	0,80
07:00	0,08	2,03	0,25	0,00	1,03
07:10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
07:20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
07:30	2,86	0,25	2,54	3,00	1,56
07:40	11,41	5,59	14,23	10,20	9,94
07:50	1,74	8,89	2,29	1,50	5,18
08:00	0,72	1,02	0,76	0,70	0,87
08:10	1,14	0,76	1,02	1,20	0,92
08:20	0,86	1,02	0,76	0,90	0,89
08:30	0,79	1,02	0,76	0,80	0,88
08:40	0,50	0,25	0,51	0,50	0,39
08:50	0,29	0,51	0,25	0,30	0,37
09:00	0,07	0,25	0,00	0,10	0,12
09:10	0,08	0,00	0,25	0,00	0,11
09:20	0,57	0,25	0,51	0,60	0,40
09:30	0,65	1,02	0,76	0,60	0,86
09:40	0,43	0,76	0,51	0,40	0,61
09:50	0,29	0,51	0,25	0,30	0,37
10:00	0,22	0,25	0,51	0,10	0,35
<b>Média</b>	<b>23,38</b>	<b>25,40</b>	<b>28,45</b>	<b>21,20</b>	<b>26,34</b>

**Tabela C.2: Evento do dia 24/01/2006 obtido por medidas de pluviógrafos.**

Hora	Precipitação (mm) medida por pluviógrafos				MÉDIA de THIESSEN
	Paranapanema	ETA	Sede	CBPO	
16:30	0,00	3,05	0,00	0,00	0,91
16:40	1,30	11,18	9,65	2,00	6,59
16:50	8,60	2,03	9,91	2,30	6,35
17:00	2,60	0,25	1,27	0,70	1,35
17:10	0,10	0,00	0,00	0,10	0,04
17:20	0,10	0,00	0,00	0,20	0,05
17:30	0,10	0,25	0,00	0,20	0,13
17:40	0,00	0,00	0,00	0,10	0,01
<b>Média</b>	<b>12,80</b>	<b>16,77</b>	<b>20,83</b>	<b>5,60</b>	<b>15,44</b>

**Tabela C.3: Evento do dia 28/01/2006, obtido por medidas de pluviógrafos.**

Hora	Precipitação (mm) medida por pluviógrafos				MÉDIA de THIESSEN
	Paranapanema	ETA	Sede	CBPO	
19:50	0,10	5,33	0,00	7,50	2,38
20:00	6,90	3,56	1,78	2,60	4,08
20:10	7,20	1,78	8,89	0,20	5,33
20:20	1,00	0,25	2,03	0,10	0,96
20:30	0,10	0,00	0,25	0,00	0,10
<b>Média</b>	<b>15,30</b>	<b>10,92</b>	<b>12,95</b>	<b>10,40</b>	<b>12,86</b>

**Tabela C.4: Evento do dia 21/02/2006, obtido por medidas de pluviógrafos.**

Hora	Precipitação (mm) medida por pluviógrafos				MÉDIA de THIESSEN
	Paranapanema	ETA	Sede	CBPO	
15:20	0,00	0,25	0,00	0,00	0,08
15:30	0,10	6,86	1,78	1,20	2,69
15:40	7,70	0,51	7,37	9,10	5,59
15:50	5,70	0,00	0,51	1,00	2,12
16:00	0,10	0,00	0,00	0,10	0,04
16:10	0,10	1,52	0,25	0,00	0,56
16:20	0,10	0,00	1,02	0,00	0,31
16:30	0,10	0,76	0,25	0,00	0,33
16:40	0,20	0,00	0,51	0,50	0,25
16:50	0,10	0,51	0,25	0,10	0,26
17:00	0,40	0,25	0,25	0,30	0,31
17:10	0,40	0,25	0,25	0,50	0,33
17:20	0,40	0,25	0,25	0,20	0,30
17:30	0,60	0,25	0,51	0,60	0,47
17:40	0,20	0,00	0,00	0,20	0,09
17:50	0,00	0,00	0,25	0,10	0,08
<b>Média</b>	<b>16,20</b>	<b>11,43</b>	<b>13,47</b>	<b>13,90</b>	<b>13,80</b>

**Tabela C.5: Evento do dia 04/03/2006, obtido por medidas de pluviógrafos.**

Hora	Precipitação (mm) medida por pluviógrafos				MÉDIA de THIESEN
	Paranapanema	ETA	Sede	CBPO	
20:10	0,00	0,51	0,00	0,00	0,15
20:20	1,20	1,78	2,54	4,30	2,05
20:30	2,00	1,02	2,54	2,80	1,93
20:40	2,80	2,03	0,25	6,30	2,23
20:50	1,20	6,86	2,54	4,20	3,56
21:00	3,10	6,60	2,54	5,50	4,24
21:10	3,10	7,11	8,38	2,60	5,68
21:20	0,70	1,02	3,81	1,60	1,72
21:30	0,50	0,51	0,51	0,60	0,51
21:40	0,60	0,76	0,25	0,70	0,57
21:50	0,80	1,02	0,76	0,60	0,83
22:00	1,40	0,76	1,02	0,70	1,03
22:10	1,10	0,76	1,02	0,90	0,96
22:20	1,00	1,02	1,02	0,80	0,99
22:30	1,10	0,76	1,02	1,10	0,98
22:40	1,00	0,76	1,02	0,90	0,92
22:50	0,90	1,02	1,02	1,10	0,99
23:00	1,20	1,02	1,02	1,10	1,09
23:10	1,10	1,02	1,02	1,10	1,05
23:20	1,00	0,76	1,02	0,70	0,90
23:30	0,70	0,51	1,02	0,70	0,73
23:40	0,70	0,76	0,76	0,60	0,73
23:50	0,60	0,25	0,51	0,60	0,47
00:00	0,40	0,00	0,25	0,30	0,23
00:10	0,20	0,00	0,25	0,20	0,15
<b>Média</b>	<b>28,40</b>	<b>38,61</b>	<b>36,07</b>	<b>40,00</b>	<b>34,69</b>

**Tabela C.6: Evento do dia 01/11/2006, obtido por medidas de pluviógrafos.**

Hora	Precipitação (mm) medida por pluviógrafos				MÉDIA de THIESSEN
	Paranapanema	ETA	Sede	CBPO	
14:30	0,00	0,00	0,51	0,30	0,22
14:40	0,10	0,25	0,00	1,50	0,25
14:50	1,90	0,00	0,25	1,10	0,64
15:00	0,00	1,02	0,00	0,00	0,30
15:10	0,10	0,00	0,51	0,10	0,22
15:20	0,00	1,78	6,10	0,10	2,80
15:30	0,50	7,37	11,94	7,60	7,50
15:40	6,60	11,18	5,59	6,20	7,56
15:50	2,60	1,78	0,00	1,00	1,23
16:00	0,30	0,00	0,25	0,20	0,18
16:10	0,20	0,25	0,00	0,50	0,17
16:20	0,40	0,51	0,51	0,30	0,46
16:30	0,40	0,25	0,51	0,50	0,41
16:40	0,30	0,51	0,25	0,10	0,33
16:50	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17:00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17:10	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17:20	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17:30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
17:40	0,10	0,00	1,27	2,30	0,72
17:50	2,40	3,05	4,06	2,70	3,24
18:00	1,10	2,79	0,25	0,50	1,24
18:10	0,40	0,51	0,25	0,10	0,35
<b>Média</b>	<b>17,40</b>	<b>31,25</b>	<b>32,26</b>	<b>25,10</b>	<b>27,82</b>

Tabela C.7: Evento do dia 26/12/2006, obtido por medidas de pluviógrafos.

Hora	Precipitação (mm) medida por pluviógrafos				MÉDIA de THIESSEN
	Paranapanema	ETA	Sede	CBPO	
00:00	2,20	-	3,05	1,10	2,37
00:10	10,80	-	7,37	5,40	8,83
00:20	3,60	-	5,33	3,10	4,18
00:30	3,10	-	2,79	3,70	3,06
00:40	2,90	-	1,78	3,70	2,59
00:50	1,50	-	0,25	1,10	0,99
01:00	0,40	-	0,51	0,60	0,47
01:10	0,40	-	0,51	0,40	0,44
01:20	0,70	-	0,51	0,50	0,60
01:30	1,00	-	1,02	0,80	0,98
01:40	0,90	-	0,51	0,70	0,73
01:50	0,50	-	0,51	0,40	0,49
02:00	0,40	-	0,51	0,30	0,43
02:10	0,30	-	0,00	0,10	0,16
02:20	0,10	-	0,25	0,10	0,16
02:30	0,00	-	0,00	0,10	0,01
02:40	0,00	-	0,00	0,10	0,01
02:50	0,10	-	0,00	0,00	0,05
03:00	0,00	-	0,00	0,20	0,03
<b>Média</b>	<b>28,90</b>	-	<b>24,90</b>	<b>22,40</b>	<b>26,57</b>

Tabela C.8: Evento do dia 27/12/2006, obtido por medidas de pluviógrafos.

Hora	Precipitação (mm) medida por pluviógrafos				MÉDIA de THIESSEN
	Paranapanema	ETA	Sede	CBPO	
13:40	1,40	-	1,27	7,20	3,86
13:50	5,80	-	5,84	9,10	7,23
14:00	5,20	-	2,29	3,90	3,85
14:10	2,00	-	1,02	0,30	1,00
14:20	0,80	-	0,00	0,10	0,28
14:30	0,10	-	0,00	0,00	0,03
<b>Média</b>	<b>15,30</b>	-	<b>10,41</b>	<b>20,60</b>	<b>16,26</b>

**Tabela C.9: Evento do dia 12/01/2007, obtido por medidas de pluviógrafos.**

Hora	Precipitação (mm) medida por pluviógrafos				MÉDIA de THIESSEN
	Paranapanema	ETA	Sede	CBPO	
18:50	0,50	-	0,00	0,00	0,25
19:00	0,10	-	1,02	0,30	0,46
19:10	2,90	-	3,56	0,20	2,79
19:20	4,20	-	2,03	1,00	2,98
19:30	1,70	-	1,52	1,40	1,60
19:40	2,00	-	11,43	2,50	5,55
19:50	11,40	-	5,33	3,50	8,13
20:00	1,80	-	0,76	1,00	1,31
20:10	1,00	-	0,76	0,90	0,90
20:20	1,30	-	5,59	6,10	3,51
20:30	4,70	-	3,05	2,60	3,82
20:40	1,10	-	0,25	0,50	0,71
20:50	0,20	-	0,25	0,20	0,22
21:00	0,10	-	0,00	0,30	0,09
21:10	0,00	-	0,00	0,20	0,03
21:20	0,10	-	0,25	0,30	0,18
21:30	0,10	-	0,25	0,20	0,17
21:40	0,10	-	0,00	0,20	0,08
21:50	0,10	-	0,00	0,00	0,05
22:00	0,00	-	0,00	0,10	0,01
22:10	0,00	-	0,00	0,00	0,00
22:20	0,10	-	0,25	0,10	0,16
22:30	0,20	-	0,25	0,20	0,22
22:40	0,10	-	0,00	0,00	0,05
22:50	0,10	-	0,25	0,10	0,16
23:00	0,00	-	0,00	0,10	0,01
23:10	0,10	-	0,00	0,10	0,06
<b>Média</b>	<b>34,00</b>	-	<b>36,83</b>	<b>22,10</b>	<b>33,50</b>

## D ANEXO D – EVENTOS ESTIMADOS PELO RADAR

---

Os eventos foram selecionados de acordo com a disponibilidade conjunta dos dados de precipitação medidos pelos pluviógrafos e estimados pelo radar meteorológico e de vazão observada. Foram escolhidas as chuvas que apresentaram os maiores picos de vazão. Assim sendo, foram selecionados nove eventos: 20/06/05, 24/01/06, 28/01/06, 21/02/06, 04/03/06, 01/11/06, 26/12/06, 27/12/06, 12/01/07, cujos dados de precipitação que foram obtidos por estimativas do radar meteorológico, podem ser visualizados nas Tabelas D.1 a D.9, a seguir:

**Tabela D.1: Evento do dia 20/05/2005, obtido por estimativas do radar meteorológico.**

Hora	Precipitação (mm) medida por radar meteorológico				MÉDIA de THIESEN
	Paranapanema	ETA	Sede	CBPO	
06:30	0,33	0,17	0,50	1,17	0,41
06:40	1,67	1,67	2,00	2,50	1,84
06:50	5,00	5,00	3,33	5,00	4,55
07:00	3,67	4,17	3,33	2,83	3,64
07:10	5,00	4,17	4,17	3,33	4,36
07:20	2,33	2,33	3,33	3,33	2,70
07:30	0,17	0,25	0,33	1,17	0,34
07:40	0,33	0,17	0,50	0,17	0,31
07:50	0,17	0,09	0,17	0,09	0,14
08:00	0,09	0,17	0,09	0,17	0,12
08:10	0,17	0,09	0,17	0,09	0,14
<b>Média</b>	<b>18,93</b>	<b>18,28</b>	<b>17,92</b>	<b>19,85</b>	<b>18,55</b>

Hora	Precipitação (mm) medida por radar meteorológico				MÉDIA de THIESEN
	Paranapanema	ETA	Sede	CBPO	
16:40	0,59	0,17	0,59	0,17	0,42
16:50	0,17	0,25	0,17	0,25	0,20
17:00	0,25	0,17	2,59	2,75	1,11
17:10	7,33	4,59	7,17	5,75	6,31
17:20	3,45	1,84	1,84	1,89	2,38
17:30	0,83	1,41	0,42	0,33	0,84
17:40	0,33	0,33	0,33	0,42	0,34
17:50	0,42	0,33	0,50	0,42	0,41
18:00	0,42	0,42	0,33	0,33	0,39
18:10	0,25	0,33	0,25	0,25	0,27
<b>Média</b>	<b>14,04</b>	<b>9,84</b>	<b>14,19</b>	<b>12,56</b>	<b>12,67</b>

Tabela D.2: Evento do dia 28/01/2006, obtido por estimativas do radar meteorológico.

Hora	Precipitação (mm) medida por radar meteorológico				MÉDIA de THIESEN
	Paranapanema	ETA	Sede	CBPO	
19:30	0,33	0,33	0,33	0,17	0,31
19:40	0,33	0,33	0,50	0,67	0,41
19:50	1,33	0,83	1,67	1,33	1,27
20:00	2,30	2,33	2,83	1,67	2,39
20:10	2,67	3,50	2,33	3,23	2,88
20:20	1,17	0,83	0,67	0,50	0,87
20:30	0,17	0,17	0,33	0,33	0,23
20:40	0,00	0,00	0,33	0,33	0,12
<b>Média</b>	<b>8,30</b>	<b>8,32</b>	<b>8,99</b>	<b>8,23</b>	<b>8,49</b>

Tabela D.3: Evento do dia 21/02/2006, obtido por estimativas do radar meteorológico.

Hora	Precipitação (mm) medida por radar meteorológico				MÉDIA de THIESEN
	Paranapanema	ETA	Sede	CBPO	
15:20	0,83	1,25	10,00	7,91	4,14
15:30	2,91	3,33	2,91	2,09	2,95
15:40	1,25	2,50	0,83	1,00	1,49
15:50	0,42	0,59	0,00	0,00	0,32
16:00	0,09	0,09	0,09	0,17	0,10
16:10	0,17	0,25	0,17	0,17	0,19
16:20	0,25	0,17	0,17	0,09	0,19
16:30	0,17	0,09	0,09	0,17	0,12
16:40	0,09	0,17	0,09	0,09	0,11
16:50	0,17	0,17	0,17	0,42	0,20
17:00	0,42	0,42	0,50	0,42	0,44
17:10	0,09	0,17	0,09	0,17	0,12
17:20	0,09	0,09	0,09	0,09	0,09
17:30	0,17	0,09	0,09	0,09	0,12
17:40	0,17	0,17	0,09	0,09	0,14
<b>Média</b>	<b>7,29</b>	<b>9,55</b>	<b>15,38</b>	<b>12,97</b>	<b>10,72</b>

**Tabela D.4: Evento do dia 04/03/2006, obtido por estimativas do radar meteorológico.**

Hora	Precipitação (mm) medida por radar meteorológico				MÉDIA de THIESSEN
	Paranapanema	ETA	Sede	CBPO	
20:20	0,33	1,00	0,00	0,00	0,41
20:30	1,00	0,42	0,25	0,00	0,52
20:40	0,42	0,25	0,09	0,17	0,25
20:50	3,34	2,50	0,67	0,17	2,05
21:00	4,17	5,00	1,42	1,67	3,43
21:10	4,59	5,84	2,25	1,42	4,02
21:20	2,09	3,09	0,83	0,50	1,89
21:30	1,00	0,67	1,17	0,83	0,93
21:40	1,09	1,42	1,84	1,42	1,42
21:50	2,09	2,50	1,67	1,67	2,06
22:00	2,09	2,09	1,17	1,17	1,75
22:10	1,67	1,67	1,67	1,17	1,62
22:20	1,67	1,42	1,42	1,67	1,53
22:30	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17
22:40	1,17	1,42	1,42	1,67	1,36
22:50	1,17	1,42	1,25	1,17	1,27
23:00	0,84	0,83	1,17	1,67	1,01
23:10	1,17	1,42	1,42	0,83	1,28
23:20	1,00	1,17	1,17	1,17	1,11
23:30	0,67	0,67	0,67	0,83	0,69
23:40	0,42	0,50	0,50	0,67	0,49
23:50	0,50	0,50	0,50	0,42	0,49
00:00	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
00:10	0,10	0,33	0,42	0,33	0,28
<b>Média</b>	<b>34,09</b>	<b>37,63</b>	<b>24,47</b>	<b>22,12</b>	<b>31,36</b>

Tabela D.5: Evento do dia 01/11/2006, obtido por estimativas do radar meteorológico.

Hora	Precipitação (mm) medida por radar meteorológico				MÉDIA de THIESEN
	Paranapanema	ETA	Sede	CBPO	
14:30	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
14:40	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
14:50	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
15:00	0,50	0,50	1,50	1,30	0,95
15:10	0,83	0,83	1,67	1,17	1,17
15:20	1,00	3,67	4,17	4,83	3,36
15:30	3,50	5,33	3,33	2,50	3,89
15:40	2,33	2,67	1,83	1,17	2,13
15:50	0,67	1,70	0,67	0,50	0,96
16:00	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67
16:10	0,83	0,67	0,67	0,83	0,72
16:20	0,67	1,17	1,17	0,67	1,01
16:30	0,67	0,33	0,67	0,67	0,57
16:40	0,67	0,67	0,67	0,67	0,67
16:50	0,67	0,67	0,33	0,33	0,51
17:00	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
17:10	0,67	0,67	0,67	1,00	0,70
17:20	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
17:30	0,50	0,25	0,25	0,33	0,32
17:40	0,17	0,17	0,17	0,33	0,19
<b>Média</b>	<b>16,17</b>	<b>21,79</b>	<b>20,26</b>	<b>18,79</b>	<b>19,64</b>

Tabela D.6: Evento do dia 26/12/2006, obtido por estimativas do radar meteorológico.

Hora	Precipitação (mm) medida por radar meteorológico				MÉDIA de THIESEN
	Paranapanema	ETA	Sede	CBPO	
00:00	0,17	0,17	0,33	0,33	0,25
00:10	0,50	0,50	0,33	0,33	0,42
00:20	1,33	0,50	1,00	1,67	0,99
00:30	2,33	2,83	2,33	2,00	2,45
00:40	1,33	2,33	2,50	1,33	2,06
00:50	1,33	2,00	3,33	1,33	2,27
01:00	8,83	6,00	5,00	7,00	6,38
01:10	4,87	4,00	4,00	5,10	4,31
01:20	1,83	1,83	1,20	1,00	1,51
01:30	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
01:40	0,83	0,67	0,67	0,67	0,71
01:50	0,33	0,33	0,67	0,50	0,47
<b>Média</b>	<b>24,18</b>	<b>21,66</b>	<b>21,86</b>	<b>21,76</b>	<b>22,32</b>

**Tabela D.7: Evento do dia 27/12/2006, obtido por estimativas do radar meteorológico.**

Hora	Precipitação (mm) medida por radar meteorológico				MÉDIA de THIESEN
	Paranapanema	ETA	Sede	CBPO	
13:30	0,50	0,00	0,17	0,83	0,29
13:40	8,17	5,83	5,83	6,67	6,69
13:50	2,50	4,17	1,67	1,33	2,66
14:00	0,83	5,67	1,67	1,17	2,54
14:10	0,67	0,83	1,33	0,67	0,90
14:20	0,33	0,67	0,83	0,33	0,57
<b>Média</b>	<b>13,00</b>	<b>17,17</b>	<b>11,50</b>	<b>11,00</b>	<b>13,65</b>

**Tabela D.8: Evento do dia 12/01/2007, obtido por estimativas do radar meteorológico.**

Hora	Precipitação (mm) medida por radar meteorológico				MÉDIA de THIESEN
	Paranapanema	ETA	Sede	CBPO	
20:00	0,17	0,00	0,17	0,33	0,16
20:10	0,17	0,33	0,17	0,83	0,42
20:20	0,33	0,50	0,33	0,17	0,34
20:30	0,33	0,67	0,83	0,50	0,66
20:40	0,67	1,30	0,93	1,17	1,13
20:50	1,33	1,07	1,00	2,33	1,43
21:00	1,93	2,03	2,83	2,17	2,33
21:10	2,67	2,33	3,33	3,17	2,91
21:20	5,83	6,17	4,00	2,17	4,28
21:30	2,47	3,60	3,67	2,83	3,37
21:40	1,17	2,17	1,67	1,17	1,69
21:50	0,83	0,83	1,00	1,00	0,94
22:00	1,70	1,20	1,20	1,20	1,21
22:10	1,83	1,33	1,63	1,33	1,44
22:20	1,53	0,83	1,16	1,88	1,26
22:30	1,43	1,43	0,91	1,13	1,17
22:40	1,67	0,77	1,17	1,67	1,19
22:50	0,60	0,70	0,33	0,67	0,57
23:00	0,35	0,33	0,40	0,67	0,45
23:10	0,33	0,33	0,33	0,33	0,33
23:20	0,00	0,17	0,17	0,17	0,17
23:30	0,33	0,17	0,33	0,33	0,27
23:40	0,33	0,33	0,33	0,17	0,28
<b>Média</b>	<b>28,00</b>	<b>28,59</b>	<b>27,89</b>	<b>27,39</b>	<b>28,00</b>