

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA UTILIZANDO O MODELO  
TOPMODEL EM BACIAS RURAIS, ESTUDO DE CASO NA  
BACIA DO RIBEIRÃO DOS MARINS – SEÇÃO  
MONJOLINHO – SP.**

**LUCIA FERREIRA**

CAMPINAS  
AGOSTO DE 2004

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA UTILIZANDO O MODELO  
TOPMODEL EM BACIAS RURAIS, ESTUDO DE CASO NA  
BACIA DO RIBEIRÃO DOS MARINS – SEÇÃO  
MONJOLINHO - SP.**

Tese submetida à banca examinadora para  
obtenção do título de Doutor em Engenharia  
Agrícola na área de concentração em Água e Solos.

**LUCIA FERREIRA**

**Orientador: Prof. Dr. José Teixeira Filho**

CAMPINAS  
AGOSTO DE 2004

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

F413s Ferreira, Lucia  
Simulação hidrológica utilizando o modelo  
TOPMODEL em bacias rurais, estudo de caso na bacia  
do Ribeirão dos Marins – seção Monjolinho - SP / Lucia  
Ferreira.--Campinas, SP: [s.n.], 2004.

Orientador: José Teixeira Filho.  
Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de  
Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Hidrologia. 2. Hidrologia Modelos. 3. Bacias  
hidrográficas. 4. Simulação e modelagem. 5.  
Escoamento. I. Teixeira Filho, José. II. Universidade  
Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia  
Agrícola. III. Título.

“O importante não é desenvolver tudo dentro de uma técnica fria e calculista, mas ter certeza de que constituiu-se em fato significativo”

Aos meus irmãos: Maria José, Graça, Auxiliadora, Rogério, Batista, Jacinta, saudoso Geraldo (in memoriam), Antonieta, Neiva, Valéria, Edson e Paulo, tio Raimundo por todo apoio, amizade e carinho de todas as horas,

**ofereço.**

Aos meus pais queridos, Geraldo e Maria Jacinta (in memoriam), pelo amor oferecido, foram fonte de conhecimento, ensinamentos e orientação em minha vida,

**dedico.**

## AGRADECIMENTOS

No caminho para executar este trabalho, sempre encontramos com pessoas, instituições que nos auxiliam a cumprir as etapas que hora se finda. É com satisfação que digo: Muito obrigado!

À Deus, fonte de toda luz que brilha em nossos caminhos.

Meus pais, irmãos, sobrinhos e cunhados pelo apoio emocional, financeiro e compreensão em todos momentos, mesmos que distantes.

Professor Dr. José Teixeira Filho, meu orientador, pelo apoio, coragem e confiança durante todo trabalho.

Dra. Maria José Brito Zakia pesquisadora do IPEF, que bem humorada se dispunha a colaborar nos trabalhos.

Professor Dr. Hilton Pinto, pela colaboração na fase inicial dos trabalhos.

Dr. Maurício Ranzini, sempre com disposição e muito gentilmente colaborou com sugestões, esclarecimento de dúvidas.

Dr. Fernando Sérgio Amaral Coelho pelos esclarecimentos das dúvidas.

Sérgio Lopes, técnico do Laboratório de Hidrologia – FEAGRI, pelo apoio constante nos trabalhos de campo.

Agradecimento especial à minha outra família: José Aldo; Laura Jane; Helena Ito; Ana; Jane, Rodolfo e Júlia; Rojane, Ernesto e Maninha; à Família Geremias; D. Araci e Rita, Maria Olímpia; Jandira e D. Mirtes; Vanilde, Gláucia pelo grande apoio e incentivo, e também aos amigos Aristóteles, Ariston, Anderson, Bernadete, Camila, Carlos, Celso, Cláudia, Daniela, Délvio, Emílio e Beth, Gabriel, Gabriela, Iran, Josane, Luciana, Marcos Roberto, Madalena, Tânia, Tanimara, Teresa, Rita, Rose, por compartilharem teto, alegrias, tristezas, experiências, enfim a trilha desta vida...

Faculdade de Engenharia Agrícola - FEAGRI, docentes, secretaria CPG, LABIN e demais funcionários pela oportunidade e apoio na realização do curso. As bibliotecárias da área de engenharia – BAE/UNICAMP

CNPq, Conselho Nacional de Pesquisa, pelo financiamento dos estudos.

Departamento de Águas e Energia Elétrica do Estado de São Paulo - DAEE, na pessoa do Engenheiro Civil Gré Lobo, pelos dados cedidos referente à vazão e precipitação na região da bacia do Ribeirão dos Marins.

Coordenadoria de Assistência Técnica Integral – CATI, na pessoa do Engenheiro Agrônomo Vanildo Pereira pelas fotos aéreas cedidas.

Enfim, a citação seria enorme, pois inúmeras pessoas as quais devo reconhecimento e agradecimento pelo papel importante que tiveram de maneira direta e/ou indiretamente nos vários momentos deste trabalho, obrigado por poder contar com vocês, e perdão àqueles que tenha esquecido...

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	ix
LISTA DE TABELAS .....	xxi
LISTA DE QUADROS .....	xxii
RESUMO .....	xxiii
ABSTRACT .....	xxiv
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. OBJETIVOS .....	4
2.1. OBJETIVO GERAL .....	4
2.1.1 <i>Objetivos específicos</i> .....	4
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	5
3.1. RECURSOS HÍDRICOS .....	5
3.2. BACIAS HIDROGRÁFICAS .....	9
3.3. IMPACTOS DO USO E OCUPAÇÃO DAS TERRAS NAS BACIAS HIDROGRÁFICAS SOBRE OS RECURSOS HÍDRICOS .....	11
3.4. MODELAGEM EM BACIAS HIDROGRÁFICAS .....	16
3.5. MODELOS HIDROLÓGICOS DE TRANSFORMAÇÃO DE CHUVA EM VAZÃO .....	20
4. MATERIAL E MÉTODOS .....	32
4.1 - MATERIAL .....	32
4.1.1 - <i>Área da pesquisa</i> .....	32
4.1.2 - <i>Conceituação do modelo TOPMODEL</i> .....	37
4.1.3 - <i>Área de acumulação de água - Índice Topográfico</i> .....	42
4.1.4 - <i>Materiais utilizados</i> .....	44
4.2. MÉTODOS .....	45
4.2.1. <i>Relevo da Bacia do Ribeirão dos Marins seção Monjolinho</i> .....	45
4.2.2 - <i>Divisor de águas da Bacia do Ribeirão dos Marins seção Monjolinho</i> .....	46
4.2.3 - <i>Uso e ocupação das terras bacia do Ribeirão dos Marins seção Monjolinho</i> .....	46
4.2.4 - <i>Caracterização do meio físico da bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho</i> .....	47
4.2.5 - <i>Dados de entrada do modelo TOPMODEL</i> .....	47
4.2.6 - <i>Calibração do modelo TOPMODEL</i> .....	54
4.2.7 - <i>Validação do modelo TOPMODEL</i> .....	55
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	56
5.1. DIAGNÓSTICO DA BACIA DO RIBEIRÃO DOS MARINS SEÇÃO MONJOLINHO .....	56
5.1.1. <i>Relevo Bacia do Ribeirão dos Marins seção Monjolinho</i> .....	56
5.1.2. <i>Uso e ocupação da terra na Bacia do Ribeirão dos Marins seção Monjolinho</i> .....	57
5.1.3. <i>Caracterização do meio físico da bacia do Ribeirão dos Marins</i> .....	59

5.2. CARACTERIZAÇÃO HIDROLÓGICA NA BACIA DO RIBEIRÃO DOS MARINS SEÇÃO MONJOLINHO.....	62
5.2.1. Precipitação na Bacia do Ribeirão dos Marins seção Monjolinho .....	62
5.2.2. Vazão na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho .....	64
5.2.3. Evapotranspiração na Bacia do Ribeirão dos Marins seção Monjolinho .....	66
5.3.1 - Simulação do modelo TOPMODEL na Bacia do Ribeirão dos Marins seção Monjolinho .....	68
6. CONCLUSÃO.....	144
7. APÊNDICES .....	147
APÊNDICE A: VELOCIDADE DE PROPAGAÇÃO NO CANAL ( <i>CHV</i> ) .....	148
APÊNDICE B: HIDROGRAMAS DE SIMULAÇÃO NO PROCESSO DE CALIBRAÇÃO .....	151
APÊNDICE C: HIDROGRAMAS DE SIMULAÇÃO NOS PROCESSOS DE VALIDAÇÃO .....	164
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	197

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema da diversidade de processos envolvidos nos sistemas de uma bacia hidrográfica. (adaptado de LIMA, 1993).....	11
Figura 2 - Representação de hidrogramas para os processos de escoamento nas diferentes condições de vegetação da bacia hidrográfica (Selby, 1993 adaptado por RANZINI, 2002).....	21
Figura 3 - Localização da bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho, no município de Piracicaba/ SP.....	33
Figura 4 - Mapa de solos da bacia do ribeirão dos Marins seção Monjolinho - (adaptado de RANIERE, 1996). ....	35
Figura 5 - Fluxograma do modelo TOPMODEL (adaptado: VARELLA e CAMPANA, 2000). ....	39
Figura 6 - Representação esquemática do balanço hídrico do solo no modelo semidistribuído TOPMODEL - adaptado de ROMANOWICZ (1997).....	40
Figura 7 - Algoritmo de múltipla direção de fluxos.....	43
Figura 8 - Localização dos pontos de medidas de precipitação e vazão na bacia do Ribeirão dos Marins seção Monjolinho – Piracicaba-SP.....	48
Figura 9 - Localização da estação fluviométrica (4D - 006) na saída da bacia do Ribeirão dos Marins seção Monjolinho – Piracicaba-SP.....	50
Figura 10 - Vista da estação fluviométrica 4D-006 instalada no exutório da bacia do Ribeirão dos Marins seção Monjolinho.....	51
Figura 11 - Modelos numéricos do terreno (MNT) na bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho, com tamanhos de células de 30x30 m, 50x50 m, 70x70 m e 100x100 m, obtidos a partir das cartas topográficas planialtimétricas na escala 1:10.000, do Plano Cartográfico do Estado de São Paulo – Secretaria de Economia e Planejamento, do Governo do Estado de São Paulo de 1977/1978, referentes as folhas Bairro Volta Grande, Mato Alto e Sete Barrocas.....	57
Figura 12 - Plano de informação do uso da terra na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho, no ano de 2001, obtido a partir de fotografias aéreas coloridas na escala 1:30.000, vôo BASEFOTO, folha SF – 23-Y-A-IV n <sup>o</sup> 68, agosto de 2000 e observações de campo realizadas no ano de 2001. Os números seguidos de cana-de-açúcar são referentes aos estágios de desenvolvimento no ano de 2001: 1- em formação; 2 – madura; 3 – plantio; 4 – soca.....	58
Figura 13 - Distribuição das precipitações médias mensais, correspondentes ao período janeiro a dezembro de 1999 e de 2000 registradas nos pluviógrafos D4-116R e D4-118R, na Bacia do Ribeirão dos Marins seção Monjolinho.....	63
Figura 14 - Distribuição de vazões médias, máximas e mínimas mensais no decorrer do ano de 1999 e de 2000, registradas no linígrafo 4D-006 pertencente ao posto hidrossedimentométrico 4D – 6FM na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho. ....	65
Figura 15 - Distribuição da evapotranspiração mensal estimada pela equação de Penman-Monteih para o ano de 1999 e de 2000, na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho. ....	67
Figura 16 - Distribuição da porcentagem relativa do índice topográfico para malhas de 30, 50, 70, 100 na Bacia do Ribeirão dos Marins seção Monjolinho.....	69

Figura 17 - Porcentagem de distribuição acumulada do índice topográfico, na área da Bacia do Ribeirão dos Marins seção Monjolinho.....	71
Figura 18 - Exemplo da regressão linear de curva de recessão para cálculo dos valores do parâmetro $m$ , para utilização no processo de simulação do modelo TOPMODEL na Bacia do Ribeirão dos Marins seção Monjolinho. $m = 1/[(1/Q2-1/Q1)/(t2-t1)]$ . ....	73
Figura 19 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de calibração utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 04 no período de 14 a 16/01/99 – 35 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho– Piracicaba – SP. ....	79
Figura 20 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de calibração utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 09 no período de 07 a 09/01/00 – 40 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006, monitorado pelo CTH/DAEE, bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP. ....	80
Figura 21 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de calibração utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 10 no período de 12 a 19/02/00 – 167 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE, bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP. ....	82
Figura 22 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de calibração utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 01 no período de 03 a 05/01/99 – 41 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE, bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP. ....	83
Figura 23 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de calibração utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 03 no período de 13 a 14/01/99 – 35 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE, bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP. ....	84
Figura 24 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de calibração utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 05 no período de 02 a 04/02/99 – 51 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE, bacia do Ribeirão Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP. ....	85
Figura 25 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de calibração utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 06 no período de 11 a 12/02/99 – 31 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE, bacia do Ribeirão Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP. ....	86
Figura 26 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de calibração utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 08 no período de 20 a 24/06/99 – 114 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE, bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP. ....	87
Figura 27 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de calibração utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 12 no período de 14 a 16/09/00 – 51	

h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na seção Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP. ....	88
Figura 28 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de calibração utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 02 no período de 11 a 12/01/99 – 33 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP. ....	89
Figura 29 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de calibração utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 07 no período de 01 a 02/03/99 – 47 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP. ....	90
Figura 30 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de calibração utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 11 no período de 23 a 24/02/00 – 32 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP. ....	91
Figura 31 - Porcentagem de variação da vazão máxima simulada para os eventos no processo de calibração pelo modelo TOPMODEL na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho. ....	94
Figura 32 - Porcentagem de variação do volume escoado para os eventos no processo de calibração pelo modelo TOPMODEL na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho. ....	95
Figura 33 - Vazão observada versus simulada para os eventos na calibração pelo modelo TOPMODEL na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho. Equação de ajuste $y = 0,9111x$ .....	96
Figura 34 - Volume observado versus simulado para os eventos na calibração pelo modelo TOPMODEL na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho. Equação de ajuste $y = 1,0858x$ .....	96
Figura 35 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação, utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 01 no período de 05 a 07/01/99 – 43 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba–SP. ....	99
Figura 36 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação, utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 02 no período de 01 a 02/02/99 – 28 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho –Piracicaba–SP. ....	100
Figura 37 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação, utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 03 no período de 07 a 11/02/99 – 99 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho –Piracicaba–SP. ....	101
Figura 38 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação, utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 04 no período de 20 a 22/02/99 – 50	

h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba–SP. ....	102
Figura 39 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação, utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 05 no período de 23 a 24/02/99 – 26 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba–SP. ....	103
Figura 40 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação, utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 06 no período de 06 a 08/05/99 – 40 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba–SP. ....	104
Figura 41 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação, utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 07 no período de 14 a 18/06/00 – 106 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho –Piracicaba – SP. ....	105
Figura 42 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 08 no período de 01 a 03/01/00 – 56 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho –Piracicaba – SP. ....	106
Figura 43 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação, utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 09 no período de 31/03 a 03/04/00 – 67 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho –Piracicaba – SP. ....	107
Figura 44 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação, utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 10 no período de 10 a 15/02/00 – 117 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho –Piracicaba – SP. ....	108
Figura 45 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação, utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 11 no período de 28/02 a 02/03/00 – 74 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho –Piracicaba – SP. ....	109
Figura 46 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação, utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 12 no período de 21 a 22/03/00 – 31 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho –Piracicaba – SP. ....	110
Figura 47 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação, utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 13 no período de 28 a 30/03/00 – 41 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada	

no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP. ....	111
Figura 48 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação, utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 14 no período de 01 a 04/09/00 – 78 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP. ....	112
Figura 49 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação, utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 15 no período de 24 a 27/11/00 – 71 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP. ....	113
Figura 50 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação, utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 16 no período de 04 a 07/12/00 – 91 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP. ....	114
Figura 51 - Porcentagem de variação da vazão máxima simulada para os eventos no processo de validação pelo modelo TOPMODEL na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho. ....	116
Figura 52 - Porcentagem de variação do volume escoado para os eventos no processo de validação pelo modelo TOPMODEL na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho. ....	117
Figura 53 - Vazão observada versus simulada para os eventos na validação1 pelo modelo TOPMODEL na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho. Equação de ajuste $y = 1,658x$ .....	118
Figura 54 - Volume observado versus simulado para os eventos no processo de validação1 pelo modelo TOPMODEL na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho. Equação de ajuste $y = 2,0154x$ .....	118
Figura 55 - Equação de regressão entre a precipitação ( $P$ ) e o armazenamento exponencial ( $m$ ), considerando probabilidade ao nível de 5% ( $P < 0,05$ ). ....	119
Figura 56 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação pela equação $y = 0,0002P - 0,0012$ , utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 01 no período de 05 a 07/01/99 – 43 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP. ....	121
Figura 57 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação pela equação $y = 0,0002P - 0,0012$ , utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 02 no período de 01 a 02/02/99 – 28 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP. ....	122
Figura 58 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação pela equação $y = 0,0002P - 0,0012$ , utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 03 no período de 07 a 11/02/99 – 99 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP. ....	123

- Figura 59 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação pela equação  $y = 0,0002P - 0,0012$ , utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 04 no período de 20 a 22/02/99 – 50 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP. ... 124
- Figura 60 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação pela equação  $y = 0,0002P - 0,0012$ , utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 05 no período de 23 a 24/02/99 – 26 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP. ... 125
- Figura 61 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação pela equação  $y = 0,0002P - 0,0012$ , utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 06 no período de 06 a 08/05/99 – 40 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP. ... 126
- Figura 62 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação pela equação  $y = 0,0002P - 0,0012$ , utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 07 no período de 14 a 18/06/00 – 106 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP. ... 127
- Figura 63 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação pela equação  $y = 0,0002P - 0,0012$ , utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 08 no período de 01 a 03/01/00 – 56 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP. ... 128
- Figura 64 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação pela equação  $y = 0,0002P - 0,0012$ , utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 09 no período de 31/03 a 03/04/00 – 67 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP. ... 129
- Figura 65 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação pela equação  $y = 0,0002P - 0,0012$ , utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 10 no período de 10 a 15/02/00 – 117 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP. ... 130
- Figura 66 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação pela equação  $y = 0,0002P - 0,0012$ , utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 11 no período de 28/02 a 02/03/00 – 74 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP. ... 131
- Figura 67 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação pela equação  $y = 0,0002P - 0,0012$ , utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 12 no período de 21 a 22/03/00 – 31 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP. ... 132
- Figura 68 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação pela equação  $y = 0,0002P - 0,0012$ , utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao

Evento 13 no período de 28 a 30/03/00 – 41 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP. ...	133
Figura 69 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação pela equação $y = 0,0002P - 0,0012$ , utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 14 no período de 01 a 04/09/00 – 78 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP. ...	134
Figura 70 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação pela equação $y = 0,0002P - 0,0012$ , utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 15 no período de 24 a 27/11/00 – 71 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP. ...	135
Figura 71 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação pela equação $y = 0,0002P - 0,0012$ , utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 16 no período de 04 a 07/12/00 – 91 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP. ...	136
Figura 72 - Variação porcentual entre a vazão máxima observada e simulada para os eventos utilizados para a validação do modelo TOPMODEL, pela equação. ....	138
Figura 73 - Variação porcentual entre os volumes das hidrógrafas observada e simulada para os eventos utilizados na validação do modelo TOPMODEL, pela equação. ....	138
Figura 74 - Vazão observada versus simulada para os eventos na validação2 pelo modelo TOPMODEL na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho. Equação de ajuste $y = 0,9126x$ .....	139
Figura 75 - Volume observado versus simulado para os eventos no processo de validação 2 pelo modelo TOPMODEL na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho. Equação de ajuste $y = 1,268x$ .....	140
Figura 76 - Porcentagem de variação do coeficiente de escoamento dos eventos submetidos ao processo de calibração pelo modelo TOPMODEL na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho. ....	141
Figura 77 - Porcentagem de variação do coeficiente de escoamento dos eventos submetidos aos processos de validação 1 (A) e 2(B), pelo modelo TOPMODEL na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho. ....	142
Figura B1 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de calibração utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 04 no período de 14 a 16/01/99 – 35 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho– Piracicaba – SP. ....	152
Figura B2 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de calibração utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 09 no período de 07 a 09/01/00 – 40 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006, monitorado pelo CTH/DAEE, bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP. ....	153
Figura B3 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de calibração utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 10 no período de 12 a 19/02/00 – 167 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada	

no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE, bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP. ....	154
Figura B4 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de calibração utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 01 no período de 03 a 05/01/99 – 41 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE, bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP. ....	155
Figura B5 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de calibração utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 03 no período de 13 a 14/01/99 – 35 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE, bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP. ....	156
Figura B6 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de calibração utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 05 no período de 02 a 04/02/99 – 51 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE, bacia do Ribeirão Marins seção Monjolinho – Piracicaba – SP. ....	157
Figura B7 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de calibração utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 06 no período de 11 a 12/02/99 – 31 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE, bacia do Ribeirão Marins seção Monjolinho – Piracicaba – SP. ....	158
Figura B8 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de calibração utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 08 no período de 20 a 24/06/99 – 114 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE, bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP. ....	159
Figura B9 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de calibração utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 12 no período de 14 a 16/09/00 – 51 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na seção Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP. ....	160
Figura B10 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de calibração utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 02 no período de 11 a 12/01/99 – 33 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP. ....	161
Figura B11 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de calibração utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 07 no período de 01 a 02/03/99 – 47 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP. ....	162
Figura B12 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de calibração utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 11 no período de 23 a 24/02/00 – 32 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP. ....	163

Figura C1 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 01 no período de 05 a 07/01/99 – 43 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba–SP. ....	165
Figura C2 – Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 02 no período de 01 a 02/02/99 – 28 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho –Piracicaba–SP. ....	166
Figura C3 – Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 03 no período de 07 a 11/02/99 – 99 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho –Piracicaba–SP. ....	167
Figura C4 – Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 04 no período de 20 a 22/02/99 – 50 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba–SP. ....	168
Figura C5 – Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 05 no período de 23 a 24/02/99 – 26 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba–SP. ....	169
Figura C6 – Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 06 no período de 06 a 08/05/99 – 40 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba–SP. ....	170
Figura C7 – Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 07 no período de 14 a 18/06/00 – 106 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho –Piracicaba – SP. ....	171
Figura C8 –Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 08 no período de 01 a 03/01/00 – 56 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho –Piracicaba – SP. ....	172
Figura C9 – Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 09 no período de 31/03 a 03/04/00 – 67 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho –Piracicaba – SP. ....	173
Figura C10 – Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 10 no período de 10 a 15/02/00 – 117	

h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho –Piracicaba – SP. ....	174
Figura C11 – Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 11 no período de 28/02 a 02/03/00 – 74 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho –Piracicaba – SP. ....	175
Figura C12 – Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 12 no período de 21 a 22/03/00 – 31 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho –Piracicaba – SP. ....	176
Figura C13 – Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 13 no período de 28 a 30/03/00 – 41 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho –Piracicaba – SP. ....	177
Figura C14 – Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 14 no período de 01 a 04/09/00 – 78 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho –Piracicaba – SP. ....	178
Figura C15 – Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 15 no período de 24 a 27/11/00 – 71 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho –Piracicaba – SP. ....	179
Figura C16 – Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 16 no período de 04 a 07/12/00 – 91 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho –Piracicaba – SP. ....	180
Figura C17 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação pela equação $y = 0,0002P - 0,0012$ , utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 01 no período de 05 a 07/01/99 – 43 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP. ....	181
Figura C18 – Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação pela equação $y = 0,0002P - 0,0012$ , utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 02 no período de 01 a 02/02/99 – 28 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão Marins seção Monjolinho – Piracicaba – SP. ....	182
Figura C19 – Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação pela equação $y = 0,0002P - 0,0012$ , utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 03 no período de 07 a 11/02/99 – 99 h, considerando a precipitação média dos	

- postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP. ... 183
- Figura C20 – Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação pela equação  $y = 0,0002P - 0,0012$ , utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 04 no período de 20 a 22/02/99 – 50 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP. ... 184
- Figura C21 – Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação pela equação  $y = 0,0002P - 0,0012$ , utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 05 no período de 23 a 24/02/99 – 26 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP. ... 185
- Figura C22 – Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação pela equação  $y = 0,0002P - 0,0012$ , utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 06 no período de 06 a 08/05/99 – 40 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP. ... 186
- Figura C23 – Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação pela equação  $y = 0,0002P - 0,0012$ , utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 07 no período de 14 a 18/06/00 – 106 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP. ... 187
- Figura C24 – Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação pela equação  $y = 0,0002P - 0,0012$ , utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 08 no período de 01 a 03/01/00 – 56 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP. ... 188
- Figura C25 – Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação pela equação  $y = 0,0002P - 0,0012$ , utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 09 no período de 31/03 a 03/04/00 – 67 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP. ... 189
- Figura C26 – Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação pela equação  $y = 0,0002P - 0,0012$ , utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 10 no período de 10 a 15/02/00 – 117 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP. ... 190
- Figura C27 – Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação pela equação  $y = 0,0002P - 0,0012$ , utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 11 no período de 28/02 a 02/03/00 – 74 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP. ... 191
- Figura C28 – Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação pela equação  $y = 0,0002P - 0,0012$ , utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 12 no período de 21 a 22/03/00 – 31 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP. ... 192

- Figura C29 – Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação pela equação  $y = 0,0002P - 0,0012$ , utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 13 no período de 28 a 30/03/00 – 41 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP. ... 193
- Figura C30 – Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação pela equação  $y = 0,0002P - 0,0012$ , utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 14 no período de 01 a 04/09/00 – 78 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP. ... 194
- Figura C31 – Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação pela equação  $y = 0,0002P - 0,0012$ , utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 15 no período de 24 a 27/11/00 – 71 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP. ... 195
- Figura C32 – Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação pela equação  $y = 0,0002P - 0,0012$ , utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 16 no período de 04 a 07/12/00 – 91 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP. ... 196

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Alguns exemplos de diferentes aplicações do TOPMODEL .....	31
Tabela 2- Relação das Cartas Planialtimétricas na escala 1:10.000, do Plano cartográfico do Estado de São Paulo da bacia do ribeirão dos Marins seção Monjolinho. ....	44
Tabela 3- Coordenadas dos postos pluviométricos na bacia do Ribeirão dos Marins seção Monjolinho – Piracicaba-SP .....	48
Tabela 4- Uso e ocupação da terra na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho, obtida a partir de fotografias aéreas coloridas na escala 1:30.000, voo BASEFOTO, folha SF – 23-Y-A-IV nº 68, agosto de 2000 e observações de campo realizadas no ano de 2001. ...	59
Tabela 5- Valores da precipitação total, vazão e volumes observados para cada um dos períodos utilizados e agrupamento dos eventos em função da precipitação no processo de calibração do Modelo TOPMODEL na Bacia do Ribeirão dos Marins seção Monjolinho – Piracicaba–SP. ....	76
Tabela 6- Parâmetros do processo de calibração do modelo TOPMODEL na bacia do Ribeirão dos Marins seção Monjolinho .....	92
Tabela 7- Valores do déficit inicial ajustados de umidade na zona das raízes ( <i>SRo</i> ) e a eficiência de Nash e Sucliffe ( <i>E</i> ) <sup>(1)</sup> para os eventos utilizados no processo de calibração	92
Tabela 8- Caracterização dos eventos utilizados no processo de validação 1 e 2 no modelo TOPMODEL na Bacia do Ribeirão dos Marins seção Monjolinho – Piracicaba–SP. ....	98
Tabela 9- Valores do déficit inicial ajustados de umidade na zona das raízes ( <i>SRo</i> ) e a eficiência de Nash e Sucliffe ( <i>E</i> ) <sup>(1)</sup> para os eventos utilizados no processo de validação 1 .....	115
Tabela 10- Valores do armazenamento exponencial ( <i>m</i> ), déficit inicial de umidade na zona das raízes ( <i>SRo</i> ) e a eficiência de Nash e Sucliffe ( <i>E</i> ) <sup>(1)</sup> para os eventos utilizados no processo de validação 2. ....	137

## LISTA DE QUADROS

- Quadro 1 - Unidades taxonômicas presentes na bacia do Ribeirão dos Marins seção Monjolinho e respectivas áreas, segundo TERAMOTO (1995) e RANIERE (1996) reclassificadas de acordo com OLIVEIRA (1999), escala 1:10.000.....36
- Quadro 2 - Resultado do cruzamento entre os planos de informação do uso e ocupação da terra, das classes de declividade e das unidades taxonômicas de solo na Bacia do Ribeirão dos Marins seção Monjolinho, Piracicaba-SP e suas respectivas áreas em hectares. ....61

## RESUMO

O estudo em bacias hidrográficas possibilita a integração dos fatores que condicionam a qualidade e a quantidade dos recursos hídricos, com os seus reais condicionantes físicos e antrópicos. A determinação das disponibilidades dos recursos hídricos, em uma bacia hidrográfica, apresenta uma grande complexidade em função das interações existentes entre os diferentes fatores condicionantes do ciclo hidrológico, notadamente, os fatores físicos. A compreensão dos mecanismos hidrológicos envolvidos entre os diferentes fatores pode possibilitar condições suficientes para a avaliação da dinâmica desses recursos. A proposta desse trabalho teve como objetivo simular o comportamento hidrológico das vazões de eventos de uma bacia hidrográfica. A Bacia hidrográfica do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho, Piracicaba/SP, com área de drenagem de 20 km<sup>2</sup> foi escolhida para esse estudo. Essa bacia apresenta características típicas das áreas agrícolas da região da bacia do rio Piracicaba. Na caracterização da bacia foram utilizados os planos de informação do relevo, uso e ocupação e solos. Os resultados indicaram que 52% da área da bacia são ocupadas pela cultura de cana-de-açúcar. Na bacia predomina os solos argissolos, com 65% da área apresentando declividades entre 6 e 20%. O modelo TOPMODEL foi aplicado à bacia para simular os escoamentos de água produzidos por eventos de precipitação. Na simulação foram executados os processos de calibração e a validação por dois procedimentos. A simulação da vazão dos eventos pelo modelo apresentou no processo de calibração tendência de subestimar as vazões máximas observadas e superestimar os volumes escoados. No processo de validação observou-se a mesma a tendência para as vazões máximas, e os volumes escoados, no processo de calibração de subestimar a vazão e superestimar o volume. O modelo TOPMODEL apresentou um bom desempenho na simulação dos eventos da bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho.

Palavras chaves: modelo hidrológico, simulação de hidrograma, bacia hidrográfica.

## ABSTRACT

The watershed study possibility factories integration, which condition the quality and quantity of water resources, with its real physics and antropics conditionings. Determination of watershed water resources availability presents a great, complexity, due to existing interactions, remarkably, physics factories. The understanding of the hydrologic mechanisms involved among the different factories may possibility enough conditions to the evaluation of the dynamics of these resources. This work proposal has as its objective to simulate hydrologic behavior of the flow events of a watershed. Ribeirão dos Marins Monjolinho section's watershed, Piracicaba/SP, with 20 Km<sup>2</sup> of drainage area was chosen for this study. That basin presents the characteristics peculiar of the agriculture areas of Rio Piracicaba basin region. In the basin characterization the plan of the relief, use, occupation and soil was used. The results had indicated that 52% of the basin area is occupied by sugar cane culture. In the basin predominates "argissolos" soil, with 65% of the area dominated by slope among 6 to 20%. The TOPMODEL model was applied to basin to simulate the water flow caused by events of precipitation. The processes of calibration and validness by two procedures, were executed in the simulation of the events flow by the model, had presented tendency in the process of calibration to sub estimate the maximum flows observed and sup estimate the volume flowed. In the process of validness it was observed a tendency to sub estimated the flow volume. In generally way, the model, TOPMODEL, had presented a good performance in the simulation of the Ribeirão dos Marins section Monjolinho events.

Key words: hydrologic modelling, hydrograph simulation, watershed

# 1. INTRODUÇÃO

## - Considerações Iniciais

O desenvolvimento socioeconômico ocorrido nas últimas décadas tem levado a transformações globais, as quais produziram mudanças importantes no ambiente. A utilização não sustentável dos recursos naturais ocasionados pelo rápido crescimento populacional e/ou consumo excessivo, tem colaborado para as transformações globais e condições de escassez, ou até mesmo esgotamento de alguns recursos. Nesse contexto, os recursos hídricos não estão fora dessas condições. Atualmente, a água é um dos recursos naturais mais ameaçados pela exploração não sustentável.

A água, segundo CORREIA (2003) vem sendo reconhecida e assumida como um recurso natural essencial ao desenvolvimento e a vida. Entretanto, essas condições anteriores não estão respeitadas, como se pode verificar a seguir:

- o consumo mundial de água quintuplicou entre 1940 e 2000;
- 20% da população mundial não têm acesso a água potável (mais de 1100 milhões de pessoas);
- o ritmo atual de crescimento da demanda de água potável produzirá até 2025 sérias carências de água para mais de 6000 milhões de pessoas no planeta;
- 80% das doenças são relacionadas à falta de água potável, e de saneamento adequado, provocando a morte de 5 milhões de crianças anualmente;

Infelizmente, a realidade brasileira não está longe da situação mundial mesmo apresentando 12% do potencial hídrico mundial. As condições de conflito têm ocorrido de maneira localizada, mas com importantes reflexos em escala geográficas extensas. Essas situações estão ligadas a questões de falta de água relacionadas à desertificação, contaminação e poluição, em regiões urbanizadas e manejo agrícola intenso. Evidências dessas situações críticas, relacionadas com a água, podem ser verificadas em algumas zonas hidrográficas do Estado de São Paulo, em especial nas Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI) do Alto Tietê, do Piracicaba, Capivari e Jundiaí, do Paraíba do Sul, da Baixada Santista e do Tietê/Sorocaba. Essas unidades apresentam 50% da demanda global de água superficial no Estado de São Paulo ( $350 \text{ m}^3/\text{s}$ ). A unidade do Piracicaba/Capivari/Jundiaí tem a segunda maior demanda de água ( $41 \text{ m}^3/\text{s}$ ) do estado dentre as UGRHI. Essa demanda, quando

comparada com a disponibilidade, mostra as condições críticas dessa região, pois, atualmente, mais de 60% das disponibilidades estão comprometidas com as demandas e esses valores deverão atingir 131% em futuro próximo (2020) (Plano... 2003).

Segundo CORREIA (2003), a política de utilização dos recursos deve ser alterada o mais rapidamente possível, notadamente nas regiões críticas. A comunidade científica e técnica devem fornecer um suporte de conhecimentos, que promova uma utilização mais harmônica com o meio, para que haja um aproveitamento sustentável dos recursos hídricos de uma bacia. O aproveitamento harmônico e sustentável só pode ser realizado tendo conhecimento das disponibilidades hídricas no espaço e tempo de uma bacia hidrográfica. Na busca desse conhecimento foram desenvolvidas diversas ferramentas que auxiliam a compreensão da dinâmica hidrológica de uma bacia. Uma das ferramentas, atualmente, utilizadas com maior intensidade são os modelo de simulação matemática dos processos hidrológicos numa bacia. Esses modelos têm sido empregados tanto para o estabelecimento do balanço hídrico em bacias hidrográficas, como para a investigação dos impactos no regime hidrológico causados pelas modificações no ambiente.

Com grande potencial estão os modelos de simulação hidrológica, que integram os componentes do balanço hídrico, com objetivo de melhorar o conhecimento das questões com relação a água na bacia hidrográfica. E, estes modelos têm tido importância na identificação e análise dos processos operantes na bacia, e ajudado de maneira efetiva nas pesquisas, principalmente como suporte nas decisões do manejo dos recursos hídricos em bacias hidrográficas.

Um modelo dos mais importantes 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.

Um dos modelos desenvolvidos mais utilizados pela comunidade técnica e científica é o modelo TOPMODEL (BEVEN e KIRKBY, 1979), que tem como característica básica a utilização da topografia no processo de simulação dos escoamentos de água de bacias a partir dos eventos de chuva. BEVEN e KIRKBY (1979) consideram esse modelo simples que exige poucos dados e parâmetros de entrada no processo de simulação. Segundo BEVEN (1997),

sua estrutura foi desenvolvida procurando utilizar parâmetros que pudessem ter uma representação espacial e, além disso, uma interpretação física dos processos hidrológicos. Para desenvolvimento do modelo TOPMODEL os autores definiram uma série de hipóteses, entre elas, condições na escalas de tempo e espaço.

#### **- Formulação da hipótese do trabalho**

A simulação hidrológica tem como princípio desenvolver modelos que representem os processos e os mecanismos hidrológicos em uma bacia. Uma qualidade importante dos modelos a ser considerada é a utilização de um número menor de parâmetros de calibração possível, sem perder o rigor da representação da realidade e dos processos hidrológicos de uma bacia. SAULNIER (1996) e IORGULESCU e JORDAN (1994) consideram que, além de uma boa representação dos processos, é necessário um conjunto de informações precisas, representativas e facilmente mensuráveis das características físicas das bacias hidrográficas. Entretanto, as interações existentes dos processos hidrológicos em uma bacia são complexas, pois os aspectos geológicos, topográficos, climáticos e hidrológicos freqüentemente estão interligados (LIMA, 1986). Outro ponto importante a ser considerado se refere à representação espacial e temporal dos processos. Desta forma, os hidrólogos trabalham dentro de um grande paradigma: como simular os processos hidrológicos de maneira eficiente e rigorosa com as limitações de informações no tempo e espaço? O modelo TOPMODEL foi desenvolvido como uma alternativa para esse paradigma. O modelo simula o escoamento superficial considerando a representação espacial dos dados, utilizando uma estrutura computacional mais simples e eficiente, sem abrir mão da formulação o mais fiel possível dos processos hidrológicos. Assim, nesse trabalho a hipótese básica está relacionada com o uso e ocupação e dimensões da bacia. Desta maneira, considerando a estrutura teórica e computacional do programa, admiti-se que o modelo é adequado para a simular os escoamentos de água em bacias hidrográficas rurais com produção agrícola, e áreas de drenagem em torno de 20 km<sup>2</sup>.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo geral**

Levando-se em conta a necessidade de entender os processos de escoamento de uma bacia, e o potencial de utilização do TOPMODEL, este trabalho objetivou simular o comportamento das vazões de eventos de uma bacia hidrográfica.

#### **2.1.1 Objetivos específicos**

- Caracterizar o meio físico da bacia;
- Caracterizar uso e ocupação da bacia;
- Caracterizar hidrologicamente a bacia;
- Estudar o comportamento das áreas variáveis de afluência;
- Modelar a relação chuva versus vazão:
  - processo de simulação para a calibração do modelo TOPMODEL;
  - processo de simulação para a verificação do modelo TOPMODEL;
  - nova proposta para a determinação dos parâmetros do modelo TOPMODEL.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1. Recursos hídricos

Nas últimas décadas tem sido observado, tanto na escala mundial como no país, uma degradação acelerada do ambiente natural. Esta degradação é derivada da utilização não sustentável dos recursos naturais, em especial do uso acima da capacidade de renovação e da poluição dos recursos disponíveis e potencial. Esse fato é resultante da adoção de modelos de desenvolvimento do território, em que não foi dada a devida importância aos recursos naturais, levando-os muitas vezes a condições de escassez e até mesmo ao esgotamento. Esta situação é provocada pelo consumo excessivo dos recursos, sendo uma das causas o rápido crescimento populacional. Apesar da crescente tomada de consciência, em todos os níveis da sociedade, infelizmente, verifica-se o agravamento dos problemas ambientais (CORREIA, 2003).

Dentre os problemas ambientais, a água como um dos mais importantes componentes do ambiente tem sido das mais degradadas, em função do aumento das demandas dos vários setores. Considerando-se que nos últimos 500 milhões de anos a quantidade total de água na terra, que é de 1.386 milhões de km<sup>3</sup>, tem permanecido de maneira constante, todavia as quantidades armazenadas nos diferentes reservatórios da terra variam substancialmente, e encontra-se em permanente movimento em um ciclo fechado (JUNQUEIRA LOPES, 2003; RAMOS, 2003; SETTI et al. 2001). Neste ciclo, anualmente cerca de 119.000 km<sup>3</sup> (22%) de água são precipitados sobre os continentes, dos quais cerca de 74.200 km<sup>3</sup> (62%) são evapotranspirados, 42.600 km<sup>3</sup> formam o escoamento superficial e 2.200 km<sup>3</sup> constituem o escoamento subterrâneo (JUNQUEIRA LOPES, 2003; RAMOS, 2003). Nesta década, estima-se que a demanda de água para uso humano no mundo será menos de 10% do volume total de água disponível (aproximadamente 44.800 km<sup>3</sup> – escoamento superficial e subterrâneo) (SETTI et al. 2001).

Atualmente, há mais de 1100 milhões de pessoas (quase 20% da população mundial) sem disponibilidade de água suficiente para consumo vivendo em áreas com moderada ou séria falta d'água (SETTI et al. 2001). Considerando o saneamento básico os valores são mais dramáticos, pois aproximadamente 40 % população mundial não dispõe deste serviço (SETTI et al. 2001). Neste decênio estima-se que a falta de água para abastecimento das populações, decorrente da má qualidade da água e/ou da falta de saneamento, seja responsável pela morte

de 2,200 milhões de pessoas por ano e 6.000 crianças diariamente, e pela doença de 250 milhões de pessoas. O consumo de água quintuplicou entre 1940 e 2000 por diferentes razões nos países desenvolvidos e nos países em desenvolvimento. Nos países desenvolvidos foi devido, fundamentalmente, aos crescentes níveis de exigência, associado à melhoria dos padrões de qualidade de vida, atingindo um consumo de até 600 litros de água por habitante por dia. Nos países em desenvolvimento, mesmo em alguns casos onde a média atinge 30 litros por habitante por dia, decorre principalmente pelo aumento populacional e das atividades econômicas (CORREIA, 2003; RAMOS, 2003; SETTI et al., 2001). Para satisfazer as necessidades da agricultura, indústria, geração de energia e outros usos, os países em desenvolvimento necessitariam de um volume de água de 5 a 20 vezes superior em relação aos valores atuais, o que corresponde a 36,5 m<sup>3</sup> por habitante por ano (SETTI et al., 2001).

CORREIA (2003); RAMOS (2003) e SETTI et al. (2001) consideram que a crise mundial da água será uma das manifestações mais dramáticas da crise ambiental e social no mundo. Esta afirmação é baseada na pressuposição de que 100 litros água diários por habitante representam o requisito mínimo para suprir as necessidades, considerando um nível adequado de saúde, o que não ocorre atualmente em diversos países do mundo.

O Brasil apresenta um potencial hídrico correspondente a 12% do total mundial, a 53% da América do Sul, e possuindo a maior bacia fluvial do mundo (Amazonas) (SETTI et al., 2001). Apesar deste potencial hídrico, a distribuição da disponibilidades de água não é homogênea entre as regiões, apresentando 68%; 16%; 7%; 6% e 3% nas regiões Norte, Centro-oeste, Sul, Sudeste e Nordeste, respectivamente. A densidade demográfica não acompanha a distribuição de disponibilidade de água nas regiões. A região Norte apresenta a maior disponibilidade, entretanto esta na região é ocupada por apenas 6% da população do país. A região Sudeste com um potencial hídrico equivalente a 1,6% de todo o território, encontra-se com 42% da população do país, sendo 22% concentra-se no Estado de São Paulo ([www.wwf.org.br](http://www.wwf.org.br)). Mesmo com este potencial hídrico o país mostra problemas graves relacionados à questão de quantidade e qualidade da água (SETTI et al., 2001). Essas questões de falta de água estão relacionadas à seca, a desertificação, a contaminação, especialmente em regiões de urbanização e agricultura intensa (SETTI et al., 2001). Os problemas de escassez hídrica no Brasil, também decorrem da combinação do crescimento exagerado das demandas localizadas. Esse fato é consequência do modelo de desenvolvimento desordenado da

urbanização, industrialização e expansão agrícola, verificado principalmente a partir da década de 1950 (SETTI et al., 2001).

Estas questões relacionadas às situações encontradas nos cursos d'água provocaram debates nacionais sobre os recursos hídricos, sendo iniciado nos anos setenta alguns princípios de gestão (BARTH, 2000). TUCCI (2004) fez uma análise histórica da situação atual e os cenários de tendências dos recursos hídricos comparando o Brasil e países desenvolvidos sob aspecto institucional, de desenvolvimento urbano e rural, energético, de desenvolvimento de recursos humano científicos e tecnológico da gestão da água. Diante do quadro de comparações das ações foi concluído que os mesmos estágios dos países desenvolvidos se verificam no Brasil com uma defasagem temporal. Concluiu também que o processo institucional brasileiro tem apresentado uma evolução muito importante nos últimos anos, o que tem sido promissor para o gerenciamento dos recursos hídricos. Mas, ainda existem muitos desafios como a ampliação do conhecimento tecnológico e científico para permitir uso dos recursos hídricos e sua preservação dentro do contexto de desenvolvimento social e econômico (TUCCI, 2004).

O sistema de gerenciamento é um sistema complexo, com interesses tão relevantes que não pode ser estabelecido em curto prazo e sem obstáculos, sendo uma decisão política motivada pela escassez e conflitos pelo uso do recurso hídrico (BARTH et al. 1987). Para a administração desses conflitos, na utilização dos recursos hídricos, requer planejamento de ações de maneira a proporcionar uso múltiplo das águas dentro da unidade de gerenciamento, que é a bacia hidrográfica (TUNDISI, 2003). O planejamento deve ter como meta recuperar a qualidade dos cursos d'água, garantir o abastecimento de água atual e futuros, alternativas de desenvolvimento econômico e social em consonância com a disponibilidade e a qualidade das águas (TUNDISI, 2003). Para alcançar estes objetivos, o conhecimento das necessidades de seus diversos usuários, a capacidade de oferta e renovação de suas fontes naturais para a caracterização e análise das condições da bacia hidrográfica torna-se fundamental um sistema de informações gerado por coleta e disponibilidade de dados, especialmente no estudo do comportamento hidrológico (BARTH et al. 1987; SETTI et al. 2001, TUNDISI, 2003). Estas informações subsidiarão com relação às decisões, a implementação de ações quanto à gestão dos recursos hídricos mais eficazes na bacia hidrográfica.

Um marco importante para o gerenciamento de recursos hídricos no Brasil foi o Acordo do Ministério das Minas e Energia e o Governo do Estado de São Paulo, em 1976. Este acordo teve como objetivo atingir melhores condições sanitárias nas bacias dos rios Tietê e Cubatão, com desenvolvimento de ações em situações críticas, a adequação de obras de saneamento, o abastecimento de água e tratamento e disposição de esgotos (ROMANO, 1997; BARTH, et al. 1987; BARTH, 2000). Este acontecimento levou a iniciativas que resultaram na criação de Comitês Executivos de Estudos Integrados em Bacias Hidrográficas (CEEIBH), os quais foram implantados em todo país. Estes comitês têm-se apresentados quanto aos estágios e implementações das ações bem diversos no nível de estado. O Estado de São Paulo evoluiu bastante na implementação dos instrumentos de gestão necessários para a política de gerenciamento dos recursos hídricos (ROMANO, 1997).

O estado de São Paulo foi dividido em 22 Unidades de Gerenciamento de Recursos Hídricos – UGRHIs, pela Lei 9.034, de 27/12/94. Essa divisão hidrográfica levou em conta, inicialmente, aspectos físicos, isto é, os divisores hidrográficos, a hidrogeologia, o clima, solos e aspectos ambientais. Mas, no segundo momento, o critério básico foi sócio-político; desenvolvimento econômico e social, coesão política, áreas e distâncias máximas para facilitar esta coesão e outros aspectos (ROMANO, 1997; BARTH, 2000). Em particular, a Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá (UGRHI – 5) foi eleita como primeira unidade que deveria ser piloto para as demais. Nesta unidade, na época de criação das unidades de gerenciamento, já se evidenciavam conflitos em torno da utilização das águas e havia forte mobilização social na busca de ações para contornar os problemas de seus recursos hídricos (BARTH, 2000). Na UGRHI – 5, o potencial de recursos hídricos superficiais não está em sua totalidade à disposição para uso na própria região. A disponibilidade hídrica desta área é afetada pela exportação de água para abastecimento da região metropolitana de São Paulo (RMSP) (cerca de 30 m<sup>3</sup>/s), pelo desenvolvimento socioeconômico aliado ao expressivo adensamento de segmentos industriais, urbanização e agricultura (PLANO... 2003). Dentro da área total da UGRHI-PCJ, na bacia do rio Piracicaba, a questão dos recursos hídricos apresenta-se como uma das mais graves. Nesta bacia, a problemática dos conflitos do uso da água está associada a sua ocupação, que representa aproximadamente 33% da superfície ocupada pela indústria e urbanização, e de 40% pela agricultura em relação à área total da unidade. A situação atual dos recursos hídricos é

considerada como crítica tanto pelas pressões de demanda, que já superam a 107,5% , como pelo comprometimento da qualidade das águas e pelo lançamento de cargas poluidoras (PLANO... 2003). E, com vistas a uma necessidade crescente de água em função do processo de desconcentração econômica da RMSP, que deverá propiciar elevação na taxa de crescimento urbano e do setor agroindustrial (PLANO... 2003). Os problemas dos recursos hídricos da bacia e as prioridades para a sua recuperação e preservação requerem conhecimentos e informações para dar suporte aos modelos de gestão. Estes modelos deverão contemplar um planejamento integrado no qual ações e investimentos, segundo uma hierarquia de prioridades definidas, possam ser consolidados de acordo com as peculiaridades dos recursos hídricos.

As peculiaridades dos recursos hídricos fundamentais para a formulação do modelo de gestão são as informações sobre a existência de múltiplos usos, a necessidade de controle dos recursos hídricos considerando o regime, a poluição e a erosão, as fases superficiais e subterrâneas do ciclo hidrológico levando-se em conta a qualidade-quantidade (BARTH et al., 1987; SETTI et al. 2001). As informações nas fases superficiais e subterrâneas do ciclo hidrológico ainda necessitam de investir no conhecimento de sua disponibilidade, qualidade, e notadamente no estabelecimento de modelos que permitem melhorar a suas estimativas dentro da bacia hidrográfica.

### **3.2. Bacias hidrográficas**

JENKINS et al. (1994) considera a bacia hidrográfica como uma unidade ecossistêmica e morfológica, que pode refletir os impactos das interferências antrópicas, como uso/ocupação do solo e atividades humanas, no balanço hídricos desta área. A bacia pode ser considerada como unidade hidrológica ideal não só do ponto de vista hidrológico, mas também no processo de gerenciamento dos recursos hídricos. Existe uma diversidade de processos envolvidos em uma bacia hidrográfica, conforme esquematizado por LIMA (1993) (Figura 1).

Considerando-se uma bacia hidrográfica é um sistema físico, no qual os processos de entrada e saída de água são representados pela precipitação e a vazão, respectivamente. Os volumes de entrada e saída não são coincidentes ocorrendo perdas de água representadas pela evaporação, transpiração e infiltração profunda da água nas bacias. A compreensão dos mecanismos de repartição da água nas bacias representa um dos mais importantes e complexos

temas, atualmente, na ciência hidrológica (LIMA, 1986 e SILVEIRA, 1993). Para compreender as inter-relações desses processos é necessária a quantificação de cada componente da circulação da água na bacia (LIMA e ZAKIA, 1998). Esses processos hidrológicos se encontram em equilíbrio e qualquer modificação implicará numa mudança compensatória para restaurar o estado de equilíbrio (LIMA, 1986). A ocupação das terras por atividades humanas pode produzir alterações importantes dos processos hidrológicos em uma bacia. Entretanto, quando essa ocupação se realizada de maneira intensiva, os efeitos resultantes podem proporcionar graus de degradação irreversíveis. Assim, as avaliações dos impactos das alterações na superfície das bacias hidrográficas só serão possíveis a partir do conhecimento aprofundado das relações dos processos nas diferentes escalas temporais.

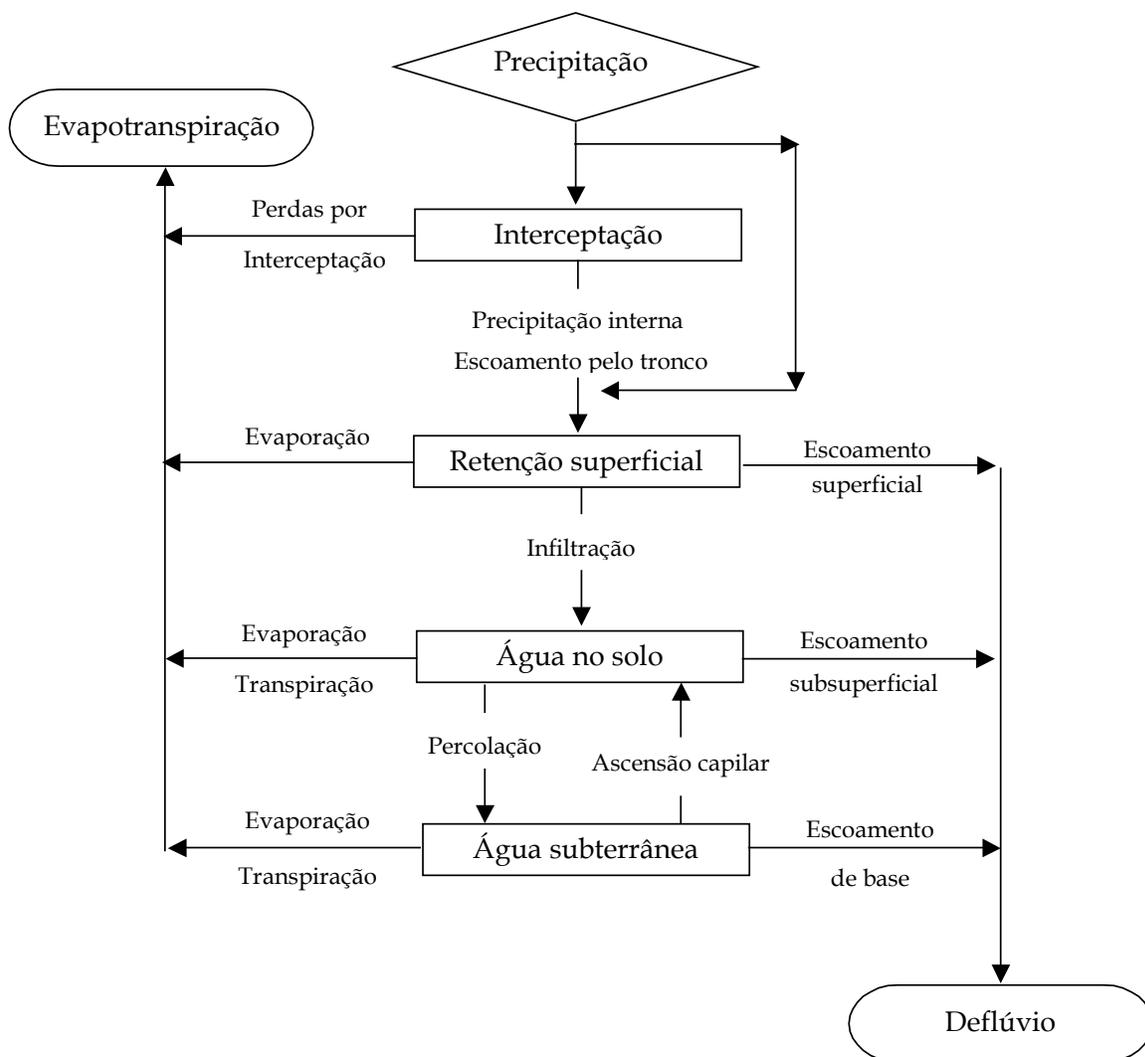


Figura 1 - Esquema da diversidade de processos envolvidos nos sistemas de uma bacia hidrográfica. (adaptado de LIMA, 1993).

### 3.3. Impactos do uso e ocupação das terras nas bacias hidrográficas sobre os recursos hídricos

Segundo GOUDIE (1995), 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 da retirada na cobertura florestal. A retirada, frequentemente, produz a implantação de agricultura com baixo grau tecnológico. O efeito final pode ser observado na degradação acelerada dos solos e das águas superficiais e subterrâneas (GOUDIE, 1995). 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, refletem na produção de água. SILVA et al. (2001), relatam que quanto mais protegida pela cobertura vegetal estiver a superfície do solo contra a ação de chuva, tanto menor a ocorrência de perda do solo e menor a degradação da água, notadamente nas regiões tropicais e subtropicais. Os autores relacionaram esses efeitos com a porcentagem de cobertura de solo com horizonte B textural e as diversas intensidades de precipitação. Eles encontraram que os maiores valores de escoamento superficial estavam relacionados com as menores porcentagens de cobertura vegetal e as maiores intensidades de precipitação. A presença de cobertura do solo proporcionou uma diminuição do escoamento superficial, da capacidade de transporte de agregados, do processo de selamento superficial (devido ao impacto das gotas de chuva), e um aumento da taxa de infiltração da água no solo.

PEKÁVORÁ e PEKÁR (1996) estudaram o impacto do uso da terra na qualidade dos rios em 15 bacias hidrográficas, onde se encontram os principais rios de quatro regiões de Carpathians na Eslováquia. Estas bacias hidrográficas têm áreas superficiais variando de 0,0864 km<sup>2</sup> a 574 km<sup>2</sup>, e a elevação entre 183 a 2177 m. Nessas regiões a precipitação anual varia entre 730 a 1278 mm. Essas bacias estão sob ocupação de florestas, atividades agrícolas e áreas urbanas, e foram estudadas para avaliar as disponibilidades de água em função da ocupação e regime hidrológico. O resultado das análises mostrou elevada concentração média anual de nitrato (NO<sub>3</sub>) em torno de 47,4 mg.L<sup>-1</sup> nas bacias com ocupação agrícola. Esta alta quantidade de nitrato é resultado da grande quantidade de fertilizantes aplicada. A concentração de nitrato na água ao longo de quarenta anos, de 1950 a 1990, apresentou um crescimento importante, refletindo o aumento da utilização de fertilizantes nitrogenados aplicados, principalmente nas áreas agrícolas e áreas de interface do meio rural e urbano. As concentrações, a partir de 1990, iniciam uma tendência de queda em função da utilização racional dos fertilizantes nitrogenados. As bacias montanhosas ocupadas com florestas, as concentrações médias anuais de nitrato tiveram valor muito baixos, praticamente ausente em

alguns casos. Ao analisar as concentrações de sulfato nas bacias, os autores encontraram valores médios anuais mais elevados nas bacias com cobertura de florestas e agrícolas, cerca de 224 mg.L<sup>-1</sup> e 130 mg.L<sup>-1</sup>, respectivamente. Nas bacias montanhosas, os valores das concentrações de sulfato (SO<sub>4</sub><sup>-2</sup>) encontrados, foram bem menores em torno de 7,6 a 13 mg.L<sup>-1</sup>. Os autores consideram que estas concentrações foram influenciadas pelo substrato geológico local. Com relação à concentração de fosfato (PO<sub>4</sub><sup>-3</sup>), as quantidades encontradas foram de 0,01 a 0,93 mg.L<sup>-1</sup>. As principais fontes de fosfatos observadas foram nos lançamentos dos esgotos das zonas urbanas, somente um quinto do volume total de esgoto era tratado. Os autores verificaram que as áreas com cobertura de florestas os valores da concentração de fosfato média anual eram menores em relação às outras ocupações, enquanto nas áreas agrícolas os valores permaneceram acima de 0,03 mg.L<sup>-1</sup>. Eles concluíram que a atividade agrícola é altamente impactante, principalmente com relação à sua contribuição na concentração de nitrato. Tendo o escoamento superficial um papel importante nesta concentração de nitrato nas águas da região, em razão do seu predomínio no escoamento total em grande parte das bacias.

Nas diferentes concepções, diversos tipos de modelos foram desenvolvidos para a simulação dos processos envolvidos na relação erosão-chuva-escoamento, tais como, USLE (Universal Soil Loss Equation – WISCHMEIER e SMITH, 1978, ou Equação Universal de Perdas de Solo - EUPS); ANSWERS (Area Non-point Source Watershed Environmental Response Simulation – BEASLEY et al., 1980); WEPP (Water Erosion Prediction Project – LANE e NEARING, 1989) e SLIM (Modelo Intermediário de Lixiviação de Solutos - ADISCOTT et al., 1986); os quais permitem a estimativa da quantidade de solo perdida por erosão, a identificação de áreas fontes críticas contribuintes da produção de sedimentos e poluentes que atingem os recursos hídricos, como também simulam escoamento para diferentes cenários nas bacias hidrográficas.

Vários são os trabalhos com emprego da EUPS para o diagnóstico e planejamento de bacias hidrográficas. Cita-se, como um dos pioneiros, nesta linha, os trabalhos de DONZELI et al. (1992) na microbacia do Córrego São Joaquim, Município de Pirassununga, SP. E, mais recentemente, a partir da EUPS foi estabelecido por PEREIRA (2002) um Índice de Fragilidade (IF) que permitiu a definição de áreas de sensibilidade ambiental pela determinação das áreas de risco de acordo com o manejo empregado. Neste trabalho foi

verificada a importância de usar uma tecnologia mais intensiva (em função do nível de manejo) para que ocorra uma redução nas áreas de elevado risco à degradação dos recursos hídricos.

A conclusão dos vários trabalhos, nos quais é empregada a Equação Universal de Perdas de Solo (EUPS), comprovam que a equação fornece resultados qualitativos que são eficientes, e importantes para o planejamento das bacias hidrográficas, pois auxiliam na identificação das áreas com problemas que, conseqüentemente, afetarão os recursos hídricos da bacia.

Os modelos WEPP e ANSWERS foram comparados por AMORIM (1999) na avaliação das perdas de solo e escoamento superficial em Latossolo Vermelho Amarelo, testando cinco declividades (2, 6, 10, 14 e 18%), e várias intensidades de precipitação utilizando simulador de chuvas (30, 46, 69, 88 e 107 mm.h<sup>-1</sup>). Os resultados obtidos permitiram concluir que as taxas de perdas de solo aumentaram proporcionalmente com a elevação da precipitação e declividade da superfície. A declividade apresentou um efeito na perda de solo menos expressivo que a energia cinética da chuva. O modelo WEPP apresentou maiores valores de perdas de solo para as menores declividades, enquanto que o modelo ANSWERS subestimou os valores de perdas de solo comparados aos dados observados. No entanto, na avaliação geral do desempenho destes dois modelos, foi observado que eles apresentaram uma subestimativa dos valores simulados tanto para as perdas de solo, como para o escoamento superficial em relação aos valores observados.

VAN HERPE et al. (1998), utilizaram duas funções do Modelo Intermediário de Lixiviação de Solutos (SLIM) para a simulação do transporte de nitrato em duas bacias rurais de 97 km<sup>2</sup> e 114 km<sup>2</sup>, localizadas na Inglaterra. Como resultado, observou que os valores de nitrato variaram entre 0,0020 a 0,0005 mg.L<sup>-1</sup> para quantidade de volume escoado de 11,5 a 9,0 m/dia no período de quatro meses (abril a agosto de 1987) em uma das bacias, enquanto que na outra foram bem inferiores os valores encontrados (0,0010 a 0,0003 mg.L<sup>-1</sup>) para uma variação no escoamento de 5,5 a 1,5 m/dia, respectivamente. A concentração de nitrato sofreu um declínio exponencial nas águas no período de baixa precipitação.

O transporte de materiais dissolvidos, ou em partículas, está intimamente ligado ao uso e ocupação da bacia, conseqüentemente ao movimento da água que influencia todos os componentes do ciclo hidrológico.

Neste contexto, a degradação dos recursos hídricos é processo complexo, porque relaciona diretamente com as condições ambientais e a utilização não sustentável dos recursos naturais. Assim, avaliação dos impactos nas alterações no uso e ocupação do solo e no manejo agrícola, antes da implantação destes no campo, representa um avanço importante para o gerenciamento dos recursos hídricos. Na medida que as alternativas para essas alterações poderiam ser analisadas, procurando minimizar os impactos no ambiente como um todo, e em especial nos recursos hídricos. Uma das principais ferramentas para avaliação de impactos nos recursos hídricos são os modelos de simulação hidrológica, na avaliação dos escoamentos produzidos na bacia.

O escoamento é o processo que corresponde ao segmento do ciclo hidrológico relativo ao movimento da água sobre a superfície e através do solo.

O processo de escoamento é governado pela taxa de infiltração da água no solo, sendo que esta varia entre os solos. Diversos fatores influenciam a infiltração da água no solo, tais como a cobertura vegetal, precipitação, estrutura do solo entre outros (MOHAMMED e GUMBS, 1982 e SOUZA, 1991). FINDELING et al. (2003) avaliaram o efeito da cobertura sobre o solo no movimento da água, principalmente na dinâmica do escoamento e transporte de materiais. A cobertura do solo quer por cobertura morta ou nos diversos estágios de desenvolvimento das plantas, afeta fortemente a dinâmica do escoamento. Esta dinâmica do escoamento foi observada quando na aplicação média de 1,5 t/ha de cobertura morta quando ocorreu uma redução do escoamento superficial em mais de 50%. A proteção do solo e a interceptação da chuva pelas plantas, quando proporciona cobertura acima de 5% da área, contribuem para o decréscimo no coeficiente de escoamento de 5 a 15%.

O escoamento superficial depende de fatores de natureza climática e de natureza fisiográfica ligada às características da bacia. No fator climático está a precipitação numa relação direta com o escoamento superficial de acordo com a intensidade, quantidade e duração das precipitações ocorridas. O escoamento superficial tende a aumentar com o aumento das características da precipitação. Também ligado às condições climáticas está a evapotranspiração que, quando intensa, no caso de temperaturas altas diminui o teor de umidade do solo. Então nos instantes iniciais de ocorrência da precipitação a velocidade de infiltração da água no solo será maior.

PUTTY e PRASAD (2000) consideraram que a água que cai sobre uma superfície da bacia hidrográfica pode promover o escoamento sob três aspectos; da área saturada também chamado de fluxo rápido; da zona lateral do solo através dos macroporos chamado de fluxo lateral e, da descarga da zona saturada do solo chamado de fluxo subsuperficial ou fluxo da água do solo. Por meio do uso de modelos torna possível investigar a resposta da bacia com relação aos seus processos de escoamentos.

### **3.4. Modelagem em bacias hidrográficas**

Modelos são representações de uma realidade, de algum objeto ou sistema, visando o entendimento de seu comportamento, transformação e/ou evolução (TUCCI, 1998; CHRISTOFOLETTI, 2002). Essa ferramenta propicia a compreensão dos sistemas e projeção de situações futuras correlacionando-as com as condições atuais e passadas, auxiliando as decisões a serem tomadas (TUCCI, 1998).

Os modelos matemáticos têm sido 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 (DeCOURSEY, 1985). Diferentes classificações dos modelos podem ser utilizadas para explicitar sua estrutura teórica, computacional, temporal, espacial e outras (TUCCI, 1998; FLEMING, 1997; SENARATH et al., 2000; SANTOS, 2001; CHRISTOFOLETTI, 2002).

Quanto à descrição dos processos, que ocorrem nos sistemas, eles se classificam em empíricos ou conceituais. Os modelos empíricos baseiam-se em equações matemáticas gerais, sem formulação teórica, não considerando os mecanismos e processos envolvidos, mas apenas relacionando os dados de causa e efeito. Normalmente, os modelos empíricos são mais simples e restritos às modificações na simulação que necessitem alterações nas escalas temporais e espaciais. Enquanto que os modelos conceituais buscam representar os componentes dos processos importantes na simulação dos eventos desejados (CHRISTOFOLETTI, 2002; SANTOS, 2001).

Em relação à estrutura espacial os modelos podem ser classificados como agregados (lumped ou globais) ou distribuídos. Nos modelos concentrados a variabilidade espacial não é considerada. Nestes modelos a superfície geográfica é considerada homogênea e uniforme. A

bacia inteira é considerada como uma unidade, onde as variáveis e os parâmetros são tidos como valores únicos para toda área, consistindo em uma simplificação importante da realidade. Por outro lado, nos modelos distribuídos, a variabilidade espacial, dos componentes e a dos valores das variáveis dentro da bacia hidrográfica, são consideradas. 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 freqüentemente 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.

O processo de aplicação dos modelos pode ser dividido por 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. 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.

Em virtude dos métodos matemáticos não representarem completamente os processos hidrológicos da bacia, faz-se um ajuste (calibragem) dos parâmetros do modelo. No entanto, a validação dos parâmetros, um importante requerimento para a confiabilidade no uso do modelo calibrado, conforme sugerido por EWEN e PARKIN (1996), geralmente não é verificada. EWEN e PARKIN (1996) e PARKIN et al. (1996), discutem procedimentos para validação de modelos de simulação hidrológica. Estes autores fizeram uma revisão sobre testes de validações de modelos para prever o impacto das mudanças do uso do solo e do clima no manejo de água em bacias hidrográficas. Nos vários tipos de testes utilizados para a validação, existe um em que o modelo não é calibrado e as previsões são simplesmente comparadas com as medições. Este tipo foi empregado por BEVEN et al. (1984) em bacias do

Reino Unido para verificar a predição do escoamento em pequenas bacias temperadas úmidas, que não possuíam estações de registro. Entretanto, foi concluído pelos autores, que este método para a validação não testa claramente um modelo como uma ferramenta de previsão. Eles propõem que deve existir uma base para os testes de validação dos modelos para uma bacia.

Dentre os modelos globais na simulação hidrológica são citados alguns exemplos. O HEC-HMS (Hydrologic Modeling System) desenvolvido pelo Hydrologic Engineering Center (HEC) do U.S. Army Corp. of Engineers (USACE). POZZEBON et al. (2000), utilizaram este programa na simulação de escoamento na microbacia do Tinga no Estado de São Paulo, mediante diversos cenários de ocupação do solo. Esta microbacia hidrográfica é uma área experimental de 81,7 ha, com relevo suave ondulado dominante, apresentando declividade média de 4,6%. Foram considerados a ocupação da área com eucalipto, cultivo e plantio direto em várias combinações de cenários. Os resultados encontrados por estes autores foram que, na associação do eucalipto com solo cultivado, ocorreu aumento de 345% em média no escoamento direto em relação à área toda coberta com eucalipto. Quando se comparou a ocupação com plantio direto e eucalipto este aumento foi bem inferior, cerca de 198%. Estas simulações apresentaram diferenças nos picos de vazão, de aproximadamente o dobro, comparando as duas combinações de eucalipto e solo cultivado com eucalipto e plantio direto, 380% e 189%, respectivamente. Estes autores consideraram que este programa é flexível, permitindo então a opção de utilização conjunta com diversos modelos para a simulação do escoamento, constituindo-se em excelente ferramenta de simulação hidrológica.

Outro modelo conceitual concentrado é o SMAP (Soil Moisture Accounting Procedure) proposto por LOPES et al. (1981) apud BARBOSA (1981). Este modelo apresenta estrutura simples e realiza o balanço da umidade do solo através de reservatórios que representam a superfície e as zonas não saturadas e saturadas do mesmo. Os parâmetros do modelo são dez e baseados no Soil Conservation Service (SCS). O modelo SMAP foi aplicado pelos autores BARBOSA et al. (2000), na bacia Antenor Navarro com 1580 km<sup>2</sup>, localizada na região semi-árida da Paraíba, para verificar o comportamento do modelo nas condições típicas do nordeste brasileiro. Observaram que ocorreram variações nos resultados das simulações do escoamento em torno de 60%, representando bem a forma, o pico e o volume do escoamento. Estes autores consideraram que as características do hidrograma foram bem

reproduzidas no processo de validação, porém o coeficiente de determinação caiu de 60% (calibração) para 50% (validação) em média. Eles julgaram que a simulação foi razoável, devido à simplicidade do modelo concentrado, sugerindo que melhores resultados seriam obtidos com a utilização de modelos que considera a complexidade dos fenômenos hidrológicos.

O modelo IHACRES (JAKEMAN et al., 1990; JAKEMAN e HORNBERGER, 1993), constitui também em exemplo de modelo conceitual da simulação chuva-vazão. CROKE et al. (2004) utilizaram este modelo para estudar o potencial do impacto da retirada de floresta, na resposta hidrológica de quatro bacias hidrográficas localizadas em regiões altas no nordeste da Tailândia, e de outras partes do sudeste da Ásia. As bacias hidrográficas estudadas apresentavam área superficial variando entre 43 a 2157 km<sup>2</sup>. A cobertura com vegetação de florestas variou entre 31 a 2024 km<sup>2</sup>, sendo a precipitação média anual de 1190 a 1362 mm. Foram considerados para a simulação vinte cenários, desde 100% de cobertura florestal até a completamente sem floresta. A partir da mudança de 20% na cobertura florestal foram observadas alterações no fluxo das pequenas bacias hidrográficas. Com o decréscimo da cobertura vegetal, o volume de fluxo na componente do escoamento rápido aumentou.

Um modelo semidistribuído que trata o mecanismo do escoamento na bacia como uma cascata de reservatórios, parcialmente paralelos, foi desenvolvido por SZILAGYI e PARLANGE (1999). Neste modelo são representados todos os caminhos possíveis que a gota de chuva pode seguir quando viaja desde seu ponto de aterrissagem até a saída, de maneira a conservar a natureza não-linear da resposta da bacia à precipitação. Esse modelo simula interceptação, evapotranspiração, infiltração, resposta às chuvas rápidas, recarga do lençol freático e do fluxo de base. A aplicação do modelo foi na bacia de Mohantango, Pensilvânia, EUA, que apresenta área de 423 km<sup>2</sup>; elevação média de 200 m; mais de 70% de sua área é coberta por florestas compostas de carvalhos, nogueiras álamo. Foram utilizados dados de precipitação horária e escoamento diário para o período de 1989 a 1995. A topografia foi representada pelo modelo digital de elevação com resolução espacial de 25 m. Para a calibração do modelo executada no período de novembro de 1991 a outubro de 1992. No balanço dos componentes dos processos hidrológicos da bacia o escoamento foi cerca de metade da precipitação recebida. O escoamento superficial foi de 28%, sendo o escoamento de base 22% do escoamento observado. Estes autores consideraram que o modelo nas condições

desta bacia foi hábil na simulação dos processos hidrológicos mais importantes, interceptação, evapotranspiração, infiltração, resposta a chuvas rápidas, recarga do lençol freático e do fluxo de base.

SIVAPALAN et al. (1997) aplicaram o modelo Capacidade Variável de Armazenamento (VBC) baseado em modelo semidistribuído para estudar o efeito da heterogeneidade das chuvas e para simular o escoamento e a resposta da umidade do solo na bacia de Lockyersleigh de 26,1 km<sup>2</sup> localizada próximo de Camberra na Austrália. Este estudo objetivou o desenvolvimento de um modelo espacialmente agrupado que incorporasse implicitamente os efeitos da heterogeneidade por processo de desagregação, agregação e validação espacialmente distribuída. Os resultados da investigação mostraram o grande efeito que a variabilidade da chuva tem no balanço dos fluxos das águas superficiais. Desde que o evento de chuva seja o mesmo, existe diferença no comportamento entre as grandes e pequenas bacias em uma mesma região geográfica e climática. Em condições de heterogeneidade de eventos de chuva o relacionamento entre área saturada e umidade do solo na bacia não constitui em avaliação simples, mas requer aproximações para determinar a magnitude da área saturada para dado estado de umidade do solo.

### **3.5. Modelos hidrológicos de transformação de chuva em vazão**

A simulação chuva-vazão representa um dos principais estudos do comportamento hídrico em bacias hidrográficas. Esses modelos simulam a resposta do escoamento superficial para várias escala de tempo: eventos e balanço hídricos. A restrição na aplicação desses modelos é a escassez de dados compatível com a simulação desejada. Os dados são obtidos a partir do monitoramento das bacias hidrográficas, que exigem esforços importantes (custos monetários e técnicos) durante longos períodos de tempo (CEBALLOS e SCHNABEL, 1998). Assim sendo, um dos principais desafios dos hidrólogos atualmente está na busca de modelos chuva-vazão que representem de forma mais fiel os parâmetros hidrológicos envolvidos utilizando bancos de dados reduzidos. Para ENGMAN (1986), o futuro da hidrologia depende em grande parte da disponibilidade de dados adequados para a construção e validação dos modelos hidrológicos.

Têm ênfase no processo de geração do escoamento as condições da superfície das bacias hidrográficas: florestas, campos agrícolas, áreas urbanas (Figura 2). Assim, as hipóteses

na formulação conceitual dos modelos devem levar em conta essas características. A Figura 2 mostra o significativo efeito da cobertura vegetal na forma do hidrograma, demonstrando a importância das condições da superfície da bacia na modelagem dos componentes do ciclo hidrológico. Em caso de terrenos íngremes com solos rasos, com baixa permeabilidade, são produzidos rápidos picos de vazão (LIMA, 1986). A taxa de produção de água e o pico do escoamento são maiores e mais rápidas em áreas onde a cobertura vegetal for menos densa, produzindo quantidades de escoamento superficiais superiores em relação a bacias com proteção vegetal maior.

Outro fator que condiciona a forma dos hidrogramas é área de influência variável. Esse conceito foi introduzido nos estudos de hidrogramas de bacias hidrográficas florestadas (LIMA, 1986), em contraposição ao conceito de geração de escoamento baseado nas teorias de Horton (ZAKIA, 1998, RANZINI, 2002). A área variável de afluência considera que o escoamento não é uniforme em toda extensão da bacia, existindo regiões onde a produção do escoamento está relacionada diretamente ao acúmulo de água. Assim, essas regiões podem se expandir ou contrair dependendo das alturas de chuva e da umidade inicial do solo.

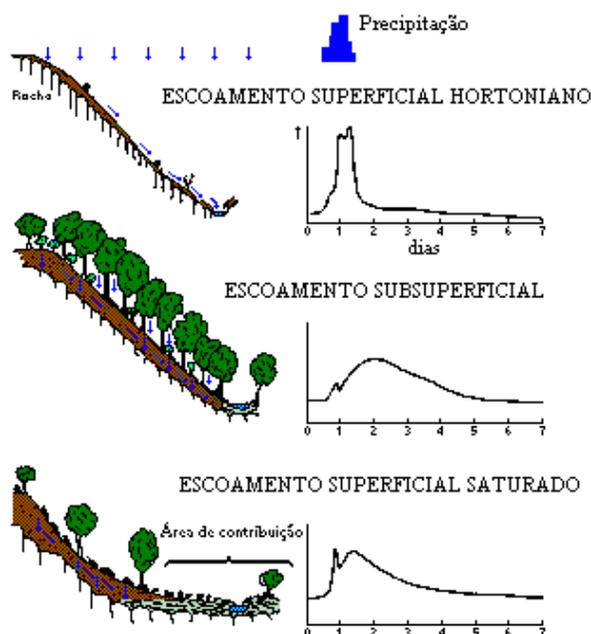


Figura 2 - Representação de hidrogramas para os processos de escoamento nas diferentes condições de vegetação da bacia hidrográfica (Selby, 1993 adaptado por RANZINI, 2002)

A expansão está relacionada com a formação do escoamento subsuperficial nas encostas, quando fluxo de água no solo é superior à capacidade de transmissão da água, assim, ocorrendo um aumento do curso d'água. Esta área de origem dinâmica corresponde a uma pequena fração da área total da bacia, variando de 1% a 50% da área de inundação, dependendo das condições locais e de umidade inicial (LIMA, 1986; ZAKIA, 1998; RANZINI, 2002). Para a bacia estudada por RANZINI (2002), a área de influência variável correspondeu a 4,5% da área total de inundação. Neste estudo, o escoamento direto foi estimado em 11,1%, em relação à chuva média anual, e o escoamento subsuperficial atingiu 6,6%. Nas investigações de SANTOS (2001) as áreas saturadas em relação à área total de inundação variaram entre 15,8 e 32,8%, sendo o menor valor obtido nos períodos de estiagem.

O trabalho de FUJIEDA et al. (1997) objetivou o estudo de processos hidrológicos, evidenciando o escoamento, em duas bacias cobertas por floresta subtropical (Mata Atlântica) na Serra do Mar, São Paulo, Brasil. As bacias possuem áreas de 56,04 ha e 36,68 ha, e encontra-se a 1000 – 1200m de altitude e era equipada com uma estação meteorológica. Estas bacias apresentam uma zona ripária larga. Nesta região, o clima é subtropical úmido, sendo que as chuvas ocorrem em todas as estações e a unidade de solo presente era o Oxisol. O escoamento superficial foi avaliado por meio de cubas basculantes (1000 cm<sup>3</sup> de capacidade) instaladas em parcelas experimentais com área de 20m x 30m, declividade de 18%, em rampas aberta e coberta por grama. O total de escoamento superficial também foi expresso como profundidade de água (mm) sobre a parcela. As medidas nas bacias foram realizadas de 1983 a 1992. Como resultado foi verificado que dos 80% da precipitação efetiva, 11% foi transformada em escoamento, que se distribuiu em 5% de fluxo superficial e 6% em subsuperficial.

Estudos têm demonstrado que a produção de escoamento superficial aumenta quando ocorre substituição de florestas por uma cobertura vegetal com sistema radicular mais superficial e com menor capacidade de interceptação. BOSCH e HEWLETT (1982) realizaram um levantamento bibliográfico de diversos experimentos que avaliavam os impactos da mudança da cobertura vegetal sobre a produção de escoamento superficial. Os autores verificaram que quando a cobertura vegetal de coníferas e eucalipto, florestas decíduas e de vegetação rasteira foi reduzida em 10%, ocorreu um aumento no escoamento superficial em média de 40mm, 25mm e 10mm, respectivamente. Portanto, a diminuição das áreas de

floresta de coníferas, decíduas e rasteiras produziu uma tendência decrescente, na produção do escoamento superficial, demonstrando a importância na determinação dos impactos no regime hidrológico e das alterações da superfície de uma bacia.

Trabalhos citados por ZAKIA (1998), mencionam que a taxa de infiltração é mantida máxima para condições de floresta natural, e a produção do escoamento superficial é mantida estável, desde que não esteja afetada por atividades antrópicas. Nesses locais onde as condições de proteção florestal, aliada às altas taxas de infiltração, produzem condições na qual o escoamento superficial é dependente diretamente da umidade do solo da bacia hidrográfica.

Alguns dos exemplos de modelos para simulação hidrológica baseados nos aspectos físicos são os modelos SHE (Système Hydrologique Européen – ABBOTT et al. 1986) e seu sucessor SHETRAN, SWAT (Soil and Water Assessment Tool – US Department of Agriculture, Agricultural Research Service no Galssland, Soil and Water Research Laboratory, Texas-EUA), TOPOG (TOPOGraphy model – O’LOUGHLIN, 1986), TOPMODEL (TOPography MODEL – BEVEN e KIRKBY, 1979).

PARKIN et al. (1996) consideram o SHETRAN como um dos mais complexos sistemas de modelos hidrológicos disponíveis para simular o ambiente próximo à superfície, notadamente na simulação do transporte de sedimentos e escoamento da água, onde cada parte da fase terrestre do ciclo da água é incluído no modelo. Este modelo foi aplicado para testes de validação em uma área de drenagem com 1,4 km<sup>2</sup>, na bacia Rimbaud localizada na França. Como resultado foi mostrado que o modelo não foi capaz de simular o fluxo lateral, e o escoamento superficial foi gerado pelo excesso de infiltração na maioria da área da bacia.

O modelo SWAT, segundo MACHADO (2002) e ECKHAARDT et al. (2003), é modelo relativamente novo com grande flexibilidade na configuração das bacias hidrográficas. Tem como característica a parametrização da bacia através de unidades de resposta hidrológica (HRU's), a estrutura dividida em sete compartimentos: hidrologia, clima, sedimentos, crescimento vegetal, manejo agrícola, nutrientes e pesticidas. E, para simulação hidrológica realizada em duas fases, uma fase é a parte terrestre do ciclo hidrológico e a outra é relacionada com movimento de água através das redes de canais para o exutório da bacia.

MACHADO (2002), utilizou o modelo SWAT na bacia do Ribeirão dos Marins, em várias combinações da cobertura vegetal e solo. Dentre os resultados encontrados, foi

verificado que ocorre variação temporal da produção de sedimentos em função do regime de precipitação. Esta variação temporal foi de 94% no período de dezembro a março, quando se tem cerca de 70% da precipitação média anual. A maior parte dos elevados valores de produção de sedimento ocorreu na parte alta da bacia, no relevo ondulado e uso intensivo do solo com a cultura da cana-de-açúcar e pastagem, e também em algumas partes médias e baixas da microbacia decorrente da contribuição dos fatores hidrológicos. O autor concluiu que por sua facilidade de interação é um modelo com capacidade de fazer simulações de longos períodos, eficiente para bacias com superfície maiores que 1000 km<sup>2</sup> e, além de incorporar características de outros modelos apresenta características importantes que o faz de ampla aplicabilidade. ECKHARDT et al. (2003), avaliaram sob diferentes tipos de cobertura da terra, tais como floresta de coníferas, mistura de florestas decíduas, pastagem e terras cultivadas com trigo, em bacia hidrográfica com área de 693 km<sup>2</sup>. Para as coberturas da terra sob floresta, o escoamento foi similar, sendo encontrado que uma mudança de 10% na cobertura de floresta causa aproximadamente uma variação na produção de água de 13 mm para a floresta com coníferas e de 10 mm para a decídua.

O TOPOG é um modelo de parâmetros distribuídos baseados na análise da topografia redistribuindo a umidade do solo no terreno natural. Este modelo simula a dinâmica espacial e temporal do movimento da água no sistema da terra caracterizado pelos solos e vegetação heterogêneos. A base do modelo é uma análise do terreno, processo no qual toma o mapa de contorno como entrada, e gera uma rede de elementos pelo cálculo da distância mínima das linhas entre os contornos adjacentes no qual os fluxos são direcionados rampa abaixo em uma dimensão. As rotinas do balanço de água pelos vários estados de equilíbrio e transientes introduzidos no modelo permitem a predição da saturação do solo, perigos de erosão, estabilidade de rampa e produção de água, bem como as interações da água superficial e subterrânea O'LOUGHLIN et al. (1989). O modelo TOPOG, segundo estes mesmos autores, pode ser adaptado para predizer o impacto hidrológico da mudança do uso da terra, pela simulação dos efeitos do balanço de água localmente alterados. Exemplos de aplicação incluem simulações do estados de umidade nas bacias, o tamanho e localização das áreas fontes não pontuais de escoamento, disposição de efluentes usando trincheiras de absorção e reabilitação de terras salinizadas.

VERTESSY, et al. (1993) aplicaram este modelo em uma bacia montanhosa de 0,32 km<sup>2</sup> plantada com eucalipto (*Eucalyptus regnans*) em condição de clímax, na Austrália. Foram comparados os valores de escoamento observados e simulados por um período de 12 anos, quando a cobertura vegetal da bacia estava sob condição de clímax. O modelo foi hábil em simular 87% da variação observada nos fluxos mensalmente no período de doze anos. O escoamento anual simulado teve variação de 5% em relação aos valores observados em seis dos doze anos de registro, enquanto que somente dois anos tiveram uma variação de 10%.

Os modelos conceituais permitem a interpretação mais precisa dos processos e dos mecanismos hidrológicos da formação dos escoamentos em bacias. Esses modelos quando conjugados com uma representação da variabilidade espacial das condicionantes hidrológica permitem uma simulação dos processos de formação dos escoamentos de forma mais próxima da realidade local (SENARATH et al., 2000). O modelo TOPMODEL (BEVEN e KIRKBY, 1979) é um desses modelos mais conhecidos na literatura. Este modelo é baseado fundamentalmente nas características topográficas da bacia hidrográfica, buscando reproduzir o comportamento hidrológico considerando as variáveis condicionantes de forma distribuída. Sua popularidade reflete a habilidade do modelo em considerar informação distribuída na bacia em uma estrutura relativamente simples, além, da utilização de poucos parâmetros de calibração. Esse modelo tem mostrado resultados consistentes com as suas premissas em diversas bacias onde foi aplicado (ZHANG e MONTGOMERY, 1994; BRUNEAU et al., 1995; BOYER et al., 1996; SAULNIER, 1996; FRANCHINI et al., 1996; MOLICOVÁ et al., 1997; COLES et al., 1997; KUO et al., 1999; DONNELLY-MAKOWECKI e MOORE, 1999; SCANLON et al., 2000; HOLKO e LEPISTO, 1997). As características do TOPMODEL têm proporcionado uma variedade de aplicações em diferentes bacias hidrográficas, na sua maioria sob condições de clima temperado e florestas, conforme alguns exemplos de aplicação do modelo apresentados na Tabela 1. A razão destes múltiplos usos para BEVEN et al. (1995) decorre da representação semidistribuída da topografia, que exerce papel fundamental na geração do escoamento.

Constitui em alguns dos exemplos da diversidade de aplicação do TOPMODEL à aplicação de VAN HERPE et al. (1998) para simular o transporte de nitrato, combinando os modelos SLIM e TOPMODEL. Nesta combinação de modelos foi composta uma série de armazenamentos de água da superfície até a saída da bacia. Estes autores obtiveram uma

eficiência na simulação das bacias hidrográficas de Zwaim em 60%, e para Sorbrook de 87% na variabilidade da concentração de nitrato, concluindo que a simulação apresentou um bom ajuste entre os dados observados e simulados.

IORGULESCU e JORDAN (1994) empregaram o modelo TOPMODEL nas bacias de Haute-Mentue, Alloux e Corbassière. Estas bacias hidrográficas localizam-se na região de no norte da região de Lausanne, e têm área superficial de drenagem de 1250 ha, 3,6 ha e 185 ha, respectivamente. As bacias apresentam clima úmido temperado, precipitação média anual por volta de 1250 mm, e evapotranspiração potencial média anual de 600mm. As altitudes variam de 694 a 930 m. A cobertura vegetal de floresta está presente em 55% na bacia de Haute-Mentue, 20% em Alloux e em 80% Corbassière. Quanto à resposta hidrológica, foi observado que as simulações foram diferenciadas em termos do mecanismo de escoamento dominante. Na bacia Alloux, especialmente em termos de volume, predomina o escoamento subsuperficial, enquanto que na Corbassière o escoamento superficial por excesso de saturação é dominante. Na bacia Haute-Mentue não foi possível a determinação do tipo de escoamento predominante e também realizar a validação do modelo TOMODEL. O modelo apresentou um melhor desempenho nos grandes eventos do que nos pequenos eventos. Mediante os resultados da aplicação do modelo nestas bacias concluíram que a topografia é relevante, mas não suficiente para que não se dê importância ao solo e a fatores geológicos na determinação de áreas saturadas. Entretanto, VAN HERPE et al. (1998) salientam que a utilização da topografia, nos modelos de simulação hidrológica, tem a sua importância por permitir um refinamento na produção do mecanismo de escoamento superficial.

A quantificação real da geração do escoamento em pequenas bacias agrícolas foi procurada nas simulações executadas por COLES et al. (1997). Foram examinadas as respostas do processo chuva-escoamento em sete bacias na região de produção de trigo do sudoeste da Austrália. Os fatores que contribuem para variabilidade na geração do escoamento, tais como, a intensidade de chuva, propriedades do solo e topografia, foram avaliadas para determinar sua influência na variabilidade e se podem ser mensuradas pelo modelo TOPMODEL. As simulações revelaram uma alta complexidade da resposta das bacias aos eventos de chuva. A geração do escoamento mostrou-se altamente heterogênea em ambas escalas de espacial e temporal. Melhores formas entre as hidrógrafas observadas e simuladas foram obtidas com as chuvas mais intensas em oposição aos eventos menos severos e maior

frequência. As simulações foram aceitáveis, para todas as bacias, em mais de 72% dos eventos selecionados no inverno, enquanto que no período de verão foi menor de 20%. Em situações, quando o solo apresentava alto déficit de umidade, associado com alta intensidade de chuva (>50 mm/h), foi difícil a simulação destes eventos. A análise das simulações em sistemas sob diferentes manejos da terra mostrou que as bacias sob ocupação com pastagem geraram maiores picos de fluxos médios (199 L/s) do que aquelas ocupadas com culturas (133 L/s). O mesmo ocorrendo com relação aos volumes de vazão gerados nas bacias sob pastagens sempre apresentou o dobro em relação àquelas com culturas, 4113 e 2210 m<sup>3</sup>, respectivamente. Como o volume total de chuva foi similar em todos os eventos, tanto para a pastagem como para culturas, outros fatores estariam atuando de forma a contribuir significativamente nas diferenças observadas nos volumes gerados. Concluíram que a resposta do escoamento foi governada pela variabilidade espacial das propriedades do solo, e topografia, sendo a variação temporal associada à intensidade de chuva.

Com a necessidade crescente do entendimento dos processos hidrológicos requeridos nos ambientes tropicais, como parte da demanda de conflitos de desenvolvimento econômico visando a sustentabilidade das terras agrícolas, conduziu MOLICOVÁ et al. (1997) a estudar a dinâmica de escoamento na Guiana Francesa. Os pesquisadores testaram a validade do modelo TOPMODEL na simulação da dinâmica do escoamento em uma área de um hectare em região de cabeceiras. Neste local a precipitação média anual é de 3300 mm e uniformemente distribuída durante o ano. A simulação dos eventos de chuva mostrou que de um total de 54 e 57 mm precipitados produziram valores de escoamento correspondentes a aproximadamente 16 e 28 mm. Estes escoamentos aconteceram após 12 e 7 mm das chuvas terem ocorrido. Esta diferença possivelmente pode ser explicada pela maior umidade do solo no segundo evento, o que melhora a interconexão das áreas de saturação local com a região da encosta, verificada pela expansão da área saturada. As hidrógrafas simuladas exibiram desempenho aceitável, tanto em forma quanto no tempo, apresentando eficiência de 95%.

O uso do TOPMODEL em condições brasileiras, realizado por MINE e CLARK (1996) na bacia de drenagem do rio Belém em Prado Velho no Estado do Paraná, foi uma das primeiras aplicações do modelo em região subtropical. Esta bacia hidrográfica possui área de drenagem de 42 km<sup>2</sup>, altitude variando de 1010 e 878 m e a precipitação média anual de 1400mm. Na análise da simulação de oito eventos apenas três apresentaram alta eficiência na

simulação (> 80%), o restante ficou abaixo de 50% em relação ao volume observado e simulado, sendo observada predominância do escoamento subsuperficial sobre o escoamento superficial.

Entre outras aplicações, mais recentemente foi realizada por RENNÓ e SOARES (2003) e COELHO (2003). Os primeiros autores usaram o índice topográfico do modelo TOPMODEL para estimar a profundidade do lençol freático na sub-bacia localizada no curso superior do rio Corumbataí, numa área de 59 km<sup>2</sup>. De acordo com a distribuição espacial do índice topográfico correlacionaram a profundidade do lençol freático, sendo que os índices topográficos inferiores a 2,9 localizados nas partes mais inclinadas do terreno, foi estimada uma profundidade do lençol freático de aproximadamente nove metros. Os autores mencionam que a estimativa da profundidade do lençol freático não foi satisfatória, principalmente quando se leva em conta a estimativa de parâmetros provenientes de medições de campo, como a transmissividade do solo.

COELHO (2003) valendo-se da estrutura do modelo, que não é um pacote fechado, procurou em seus estudos desenvolver um modelo que agregando a leitura fisiográfica realizada pelo método do Hidrograma Unitário Instantâneo Geomorfológico (HUIG) com modelo TOPMODEL, gerou o TOPMODIF. Este modelo híbrido foi testado em duas bacias hidrográficas de 38 km<sup>2</sup> e 67 km<sup>2</sup>, localizadas na bacia do Paraíba do Sul – SP. Dos cinco eventos simulados no TOPMODIF, a eficiência ficou em termos médios em aproximadamente 63%, enquanto que a simulação somente pelo modelo TOPMODEL apresentou eficiência cerca de 68,5%. Pelos melhores resultados, quando da simulação dos eventos com o modelo TOPMODEL nas duas bacias hidrográficas em relação ao modelo modificado, foi concluído que a inclusão da leitura fisiográfica do modelo HUIG no modelo TOPMODEL não proporcionou melhora na performance da simulação dos eventos. Portanto, a estrutura original deve ser preservada e testada para outras situações.

Uma das limitações da aplicação do modelo TOPMODEL está na determinação do índice topográfico. O índice topográfico, que é a função de distribuição dos pontos de similaridade hidrológica na bacia hidrográfica, depende de como esta distribuição é realizada, que é a sua formulação. Esta discretização é função do tamanho da malha adotada no modelo numérico do terreno (MNT). O tamanho da malha nos modelos distribuídos tem efeito direto na informação e na precisão da saída da simulação e os valores dos parâmetros podem não ter

interpretação física dependendo deste tamanho adotado. Dos estudos que têm analisado o efeito do tamanho da malha na simulação da bacia, destaca-se QUINN et al. (1991), MOORE et al. (1993), ZHANG e MONTGOMERY (1994), BRUNEAU et al. (1995). Estes autores estudaram como o tamanho da malha afeta as características topográficas computadas no índice de umidade e fluxo de saída. Eles encontraram que em tamanho de malhas menores proporcionavam mais precisão nos resultados. ZHANG e MONTGOMERY (1994) observaram as malhas com 10 m de dimensão registrou melhor desempenho em relação a 30 e 90 m, mas, no geral, nenhum benefício real foi ganho com resolução menor. Enquanto, KUO et al. (1999), encontraram desvios de simulações para menores tamanhos de malhas aumentando proporcionalmente quando foi elevando de 10 até 100m, que é a faixa de tamanho mais comuns nos estudos de simulação hidrológica. Recomendando tamanho de malhas menores que 30 m e preferivelmente 10 m, dependendo da disponibilidade de dados. TOMPSON e MOORE (1996) notaram que o índice topográfico derivado de 8m de malha promoveu predições estatisticamente significantes da saturação do solo, o que não aconteceu com 16 m de malha. De acordo com ZAKIA (1998), malhas de 5X5 m permitiram melhor ajuste das informações de vegetação em sua simulação para determinar a zona ripária na bacia do Córrego da Onça em Arapoti-PR. A autora também indica que a malha de 10X10m apresentaria bons resultados para outras finalidades. QUINN et al. (1995) afirmam que grandes malhas não são representativas de detalhes da forma da bacia, contudo são úteis para interpretação em macroescala do fluxo de umidade e predição de hidrógrafas.

Em condições tropicais as investigações com TOPMODEL têm sido realizadas para análise dos processos hidrológicos envolvidos na geração do escoamento pelos autores MINE e CLARK (1996), MOLICOVÁ et al. (1997), ZAKIA (1998), SCHULER et al. (2000), VARELLA e CAMPANA (2000), SANTOS (2001), RANZINI (2002).

Os resultados de MOLICOVÁ et al. (1997) e SANTOS (2001) foram possivelmente às aplicações que promoveram as melhores aproximações das predições de geração do escoamento para eventos contínuos nos trópicos úmidos. RANZINI (2002) observou que a melhor eficiência do modelo foi para a simulação de eventos isolados, apenas 2% do total de eventos simulados apresentaram eficiência acima de 70%.

Algumas limitações no processo de modelagem seriam a ausência de sensibilidade para determinados parâmetros, a representação das condições de entrada, o comportamento

heterogêneo das chuvas, os quais refletem para a não-equivalência entre os processos simulado e observado, foram às considerações de SCHULER et al. (2000).

Para VARELA e CAMPANA (2000), este modelo aplicado na bacia do Rio Descoberto localizada no Distrito Federal e Estado de Goiás, seria mais apropriado para os estudos no qual o interesse seria a vazão e o tempo de picos, no caso as enchentes, mais do que na forma do hidrograma. Apesar da eficiência baixa nas diversas simulações, o modelo é promissor na modelagem do escoamento, mesmo quando aplicado em situações na qual as informações são insuficientes, tanto quantitativamente quanto qualitativamente (MINE e CLARK, 1996).

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 com atividades agrícolas dominantes. Tais fatos incentivaram a proposição da abordagem de conhecimento da dinâmica do comportamento hidrológico de uma bacia rural com a utilização de um dos modelos mais difundidos na atualidade. Em virtude da complexidade e relevância dos problemas ambientais, e, carência de dados, estimulou a busca de informações que possam contribuir para os trabalhos de planejamento.

Tabela 1- Alguns exemplos de diferentes aplicações do TOPMODEL

Bacia	Área (km <sup>2</sup> )	Relevo (m)	Uso/ocupação	Descrição do tratamento	Referências
Slampton Wood Inglaterra	0,94		Floresta	Comparação de melhoramento no TOPMODEL	Beven, K. e Freer, J. (2001)
Sorbrook Zwalm, Inglaterra	97 114		Agricultura, floresta e urbanização	Comparação com dados de campo dos teores de nitrato simulados	Van Herpe, Y.; Troch, P.A.; Callewier, L.; Quinn, P.F. (1998)
3 bacias em Fall Creek New York	6,47 23,6 7,42	317 - 488	Floresta úmida, culturas, pastagens, urbanização	Avaliação do efeito de escala na simulação do conteúdo da água e escoamento	Kuo, W.L.; Steenhuis, T.S.; McCulloch, C.E.; Mohler, C. L.; Weinstein, D.A.; DeGloria, S.D.; Swaney, D.P. (1999)
Deer Creek Colorado - USA	10,6	3350 – 4120		Verificação da variação da concentração do oxigênio dissolvido, analisando a resposta hidrológica	Boyer, E.W.; Hornberger, G.M.; Bencala, K.E.; McKnight, D. (1996)
Lockyersleigh Austrália	26,1		Floresta	Investigação dos parâmetros do modelo	Sivapalan, M.; Woods, R.A.; Kalma, J.D. (1997)
Guadalpelson Cáceres - Espanha	0,35	378 (média)	Quercus rotundifolia Vale - herbáceas	Identificação dos processos hidrológicos operantes na bacia	Ceballos, A. e Schnabel, S. (1998)
Sieve - Itália Real Collobrier -França	840			Análise dos conceitos do TOPMODEL	Franchini, M.; Wendling, J.; Obled, C.; Todini, E. (1996)
South Fork Brokenback Run Virginia	2,37	996 - 1005		Observação física da versão modificada do TOPMODEL	Scanlon, T.M.; Raffensperger, J.P.; Hornberger, G.M.; Clapp, R.B. (2000)
50km oeste de Vancouver	0,383 0,199	280 a 447 175 a 319	Floresta madura	Verificação da função resposta quase distribuída do modelo	Donnelly-Makowecki, L.M.; Moore, R.D. (1999)
Nasten Kassjoan, Suécia	6,6 164	18 - 55 227 - 532	Floresta	Predições da distribuição da umidade das bacias	Rodhe, A. e Seibert, J. (1999)
Ribeirão Jalovecky Eslováquia	22,1	800 a 2178	Florestas, campinas, rochas	Simulação do comportamento hidrológico	Holko, L. Lepisto, A. (1997)
Cabeceira da bacia do Rio Ebonyi (Guiné)	379	105 a565	Floresta úmida	Verificação da resposta hidrológica dos mecanismos de geração do escoamento	Campling, P. et al. (2002)

## **4. MATERIAL E MÉTODOS**

### **4.1 - Material**

#### **4.1.1 - Área da pesquisa**

A área de estudo, Bacia do Ribeirão dos Marins, corresponde à parte da bacia do rio Piracicaba. Esta bacia participa da Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos Piracicaba, Capivari e Jundiá (UGRH PCJ - 5). Essa unidade localiza-se na região centro-oriental do Estado de São Paulo, com uma extensão de aproximadamente 12.400 km<sup>2</sup>, sendo que desta área 90% está situada no Estado de São Paulo e, corresponde a 4,7% da superfície estadual. Grandes e importantes núcleos urbanos, com uma crescente industrialização e expansão das atividades agrícolas, tomam lugar nesta bacia proporcionando sérios problemas ambientais e elevada demanda pelos recursos hídricos. Dentre as atividades agrícolas a cultura da cana-de-açúcar tem predominância. A Bacia do Ribeirão dos Marins está circunscrita nas seguintes coordenadas geográficas: 22<sup>o</sup>41' e 22<sup>o</sup>51' de latitude Sul e 47<sup>o</sup>40' e 47<sup>o</sup>45' de longitude Oeste, com área de drenagem de 5907 ha.

##### **4.1.1.1 - Localização da área de estudo – seção Monjolinho**

A seção Monjolinho da Bacia do Ribeirão dos Marins foi escolhida para aplicação do modelo TOPMODEL. Essa seção é uma sub-bacia do Rio Piracicaba, situada entre as latitudes 22<sup>o</sup>46' e 22<sup>o</sup>51' Sul e longitudes 47<sup>o</sup>41' e 47<sup>o</sup>44' Oeste, com superfície de drenagem de 2202 ha (Figura 3). A seção Monjolinho, seção de extremo de jusante da bacia, encontra-se próximo à confluência do Ribeirão dos Marins e a rodovia PI-40, que liga Piracicaba a Anhumas/Saltinho.

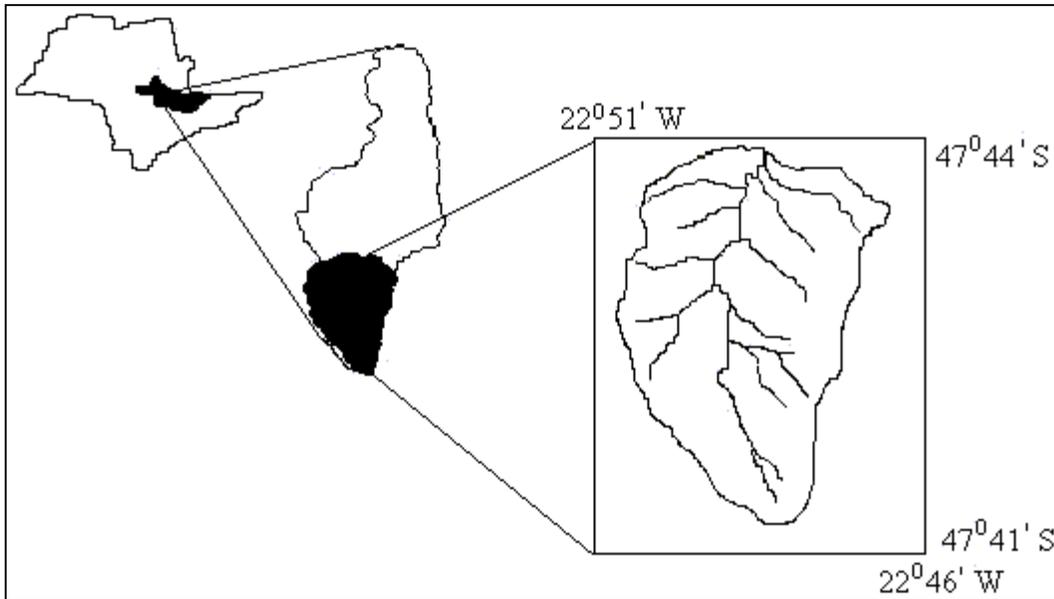


Figura 3 - Localização da bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho, no município de Piracicaba/ SP.

#### 4.1.1.2. Caracterização física

##### 4.1.1.2.1. Clima

O clima na área da bacia, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Cwa – mesotérmico úmido subtropical caracterizado por inverno seco e temperatura média do mês mais quente e superior a 22<sup>o</sup>C. A temperatura média anual atinge 20,5<sup>o</sup>C, com média máxima de 29,5<sup>o</sup>C e de média mínima 15,6<sup>o</sup>C. As temperaturas mais elevadas ocorrem no período de dezembro a março, com valores médio superiores a 22<sup>o</sup>C, enquanto que as mais baixas no bimestre de junho-julho com temperaturas médias de 17<sup>o</sup>C.

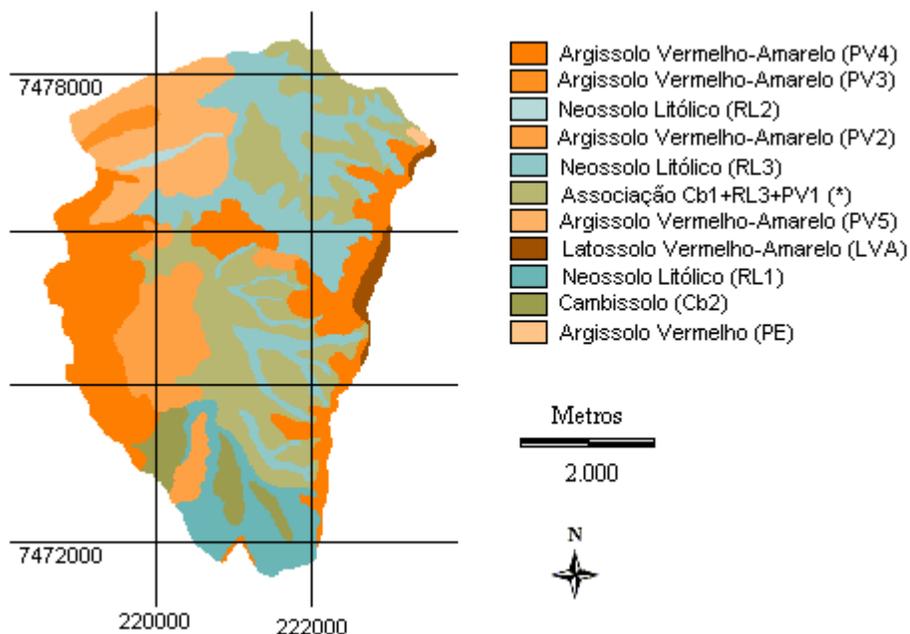
##### 4.1.1.2.2. Geologia, Geomorfologia e Solos

Na bacia do Ribeirão dos Marins as unidades principais são as formações Pirambóia e Corumbataí representados por arenitos, siltitos, argilitos, folhelhos e sílex. Na área também existem depósitos coluviais no fundo dos vales (TERAMOTO, 1995).

A Bacia do Ribeirão dos Marins apresenta relevo suave ondulado, ondulado e fortemente ondulado. O declive nas encostas está em torno de 5 a 10% com o comprimento de rampas variando entre 500 a 1000 m (TERAMOTO, 1995).

A partir da informação de base das características dos solos na escala 1:100.000 da quadrícula de Piracicaba do Estado de São Paulo, do mapa planialtimétrico (1:10.000) e das fotografias aéreas (1:25.000), TERAMOTO (1995) e RANIERE (1996) realizaram um levantamento das unidades de solos. Esse levantamento das unidades de solos da bacia foi montado a partir de um reconhecimento detalhado na escala 1:10.000. Na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho, foi mapeada 11 unidades taxonômicas de solos (Quadro 1 e Figura 4). Os solos presentes nesta seção foram classificados de acordo com OLIVEIRA, (1999).

Na Bacia do Ribeirão Marins, seção Monjolinho, as classes de solos predominantes são de Argissolos e Neossolos Litólicos (Figura 4), com 44% e 26% respectivamente, e considerando a área total da Bacia do Ribeirão dos Marins, estes solos correspondem a 28% e 23% (RANIERE, 1996; TERAMOTO, 1995). A maioria dos argissolos possui textura arenosa/média, e no perfil verifica-se a presença de maiores teores de argila, o que pode acarretar dificuldades na determinação da infiltração de água no solo, em decorrência da permeabilidade diferenciada entre camadas. Os Neossolos Litólicos possuem textura argilosa com a presença de sílex de forma quase contínua. Essa característica interfere na percolação da água e, associada a sua localização nas maiores declividades, propicia uma maior tendência de formação de escoamento superficial. Os solos rasos na Bacia do Ribeirão Marins, seção Monjolinho, correspondem a 30% da área total. Entretanto, esses solos são predominantes quando se considera a Bacia do Ribeirão dos Marins. (RANIERE, 1996; TERAMOTO, 1995).



(\* ) Cambissolo (Cb1) + Neossolo Litólico (RL3) + Argissolo Vermelho-Amarelo (PV1)

Figura 4 - Mapa de solos da bacia do ribeirão dos Marins seção Monjolinho - (adaptado de RANIERE, 1996).

#### 4.1.1.2.3. Uso e ocupação das terras

Na Bacia do Ribeirão dos Marins a vegetação original encontra-se quase inexistente, com seus remanescentes localizando-se apenas em algumas grotas e margens no ribeirão ocupando 12%. A cultura de cana-de-açúcar ocupa em grande parte os terrenos da bacia, cerca de 56% da área total, enquanto a pastagem e a área urbana abrangem em torno de 30% e 2%, respectivamente (MACHADO, 2002). A cultura de cana-de-açúcar é cultivada nas áreas de menor declividade, enquanto que a pastagem toma lugar em terrenos mais íngremes. A presença do eucalipto é observada em pequenas áreas mais elevadas e em alguns fundos de vales (TERAMOTO, 1995).

Quadro 1 - Unidades taxonômicas presentes na bacia do Ribeirão dos Marins seção Monjolinho e respectivas áreas, segundo TERAMOTO (1995) e RANIERE (1996) reclassificadas de acordo com OLIVEIRA (1999), escala 1:10.000

Unidades taxonômicas		Área (ha)	Nomenclatura atual
PV2	Podzólico Vermelho-Amarelo, álico ou distrófico, Ta ou Tb, A moderado, textura média/ argilosa	209	Argissolo Vermelho-Amarelo (PV)
PV3	Podzólicos Vermelho-Amarelos textura arenosa/argilosa, abruptos	24	
PV4	Podzólicos Vermelho-Amarelos textura arenosa / média	497	
PV5	Podzólicos Vermelho-Amarelos textura média /argilosa	239	
PE	Podzólicos Vermelho-Escuros, textura argilosa ou argilosa / muito argilosa	4	
RL1	Solo Litólico, textura arenosa	157	Neossolos Litólicos (RL)
RL2	Solo litólico, textura média	13	
RL3	Solo litólico álico ou distrófico, Ta ou Tb, A moderado, textura argilosa, substrato siltitos da formação Corumbataí	403	
Cb2	Cambissolos de textura média	83	Cambissolos (C)
LV	Latossolo Vermelho - Amarelo, álico ou distrófico, A moderado, textura média	29	Latossolos Vermelho-Amarelos (LVA)
Associação Cb1+RL3+PV1	Cb-1 - Cambissolos indiscriminados, substrato siltitos e folhelhos da formação Corumbataí Li3 - Solo litólico álico ou distrófico, Ta ou Tb, A moderado, textura argilosa, substrato siltitos da formação Corumbataí PV-1 - Podzólico Vermelho-Amarelos indiscriminados fase pouco profundos, substratos siltitos e folhelhos da formação Corumbataí.	543	Cambissolo+ Neossolo Litólico+ Argissolo Vermelho-Amarelo

MORETTI (2001) realizou um levantamento de uso e ocupação na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho, e determinou na bacia a área de 47%, 35% e 8% era ocupada por cana de açúcar, pastagem e mata ciliar, respectivamente.

#### 4.1.2 - Conceituação do modelo TOPMODEL

O modelo TOPMODEL foi desenvolvido no Centre for Research on Environmental Systems, University of Lancaster, na Inglaterra e está disponível no endereço [www.es.lancs.ac.uk/es/Freeware/Freeware.html](http://www.es.lancs.ac.uk/es/Freeware/Freeware.html).

O TOPMODEL não é uma estrutura de modelo fechada, pois permite a implantação de sub-rotinas e alterações dentro do programa original. O modelo considera uma série de conceitos, que permitem a simulação hidrológica de uma bacia utilizando uma representação espacial distribuída, apresentando uma estrutura matemática e paramétrica simples. O programa apresenta um número mínimo de parâmetros de calibração, os quais não são meramente ajustados, mas representam aspectos conceituais físicos na simulação proposta (SAULNIER, 1996). O modelo TOPMODEL estabelece que a topografia é a informação fundamental na geração do escoamento direto da bacia hidrográfica.

O modelo utiliza o princípio da conservação da massa (Entrada = Saída), isto é, a diferença entre as taxas de fluxo de entrada e saída da bacia determinará a taxa de variação do armazenamento de água. A variação da taxa armazenamento de água é realizada por diversos reservatórios, destacando: a capacidade de interceptação da vegetação, o escoamento superficial saturado gerado pela infiltração excedente e o fluxo de água na zona saturada (BEVEN e KIRKBY, 1979). A taxa de armazenamento de água no reservatório de interceptação é calculada pela taxa de evaporação potencial. A diferença entre a precipitação sobre a vegetação e a evaporação potencial determina a precipitação efetiva, ou a quantidade de água que atinge o solo. A precipitação efetiva constitui a entrada para o reservatório de solo, que é dividido em duas zonas, a zona não saturada e a zona saturada. De acordo com os estudos de BEVEN (1997); ROMANOWICZ, (1997); SAULNIER (1996); FRANCHINI et al. (1996); MINE e CLARK (1996); ZAKIA (1998); SANTOS (2001); RANZINI (2002), COELHO (2003), o modelo TOPMODEL apresenta algumas suposições básicas na definição do balanço hídrico do solo como:

- a dinâmica da zona saturada pode ser obtida por sucessivos estados de equilíbrio (“steady-state”);
- o gradiente hidráulico do escoamento na zona saturada pode ser obtido pela declividade da topografia local ( $tg\beta$ );

- a distribuição da transmissividade da água ao longo da profundidade do solo varia exponencialmente com o déficit de armazenamento, tendo como limite inferior o plano de saturação;

- a taxa de recarga para a região de saturação é considerada homogênea na escala espacial ao longo do tempo.

A primeira e segunda suposição condiciona o armazenamento e os níveis locais do lençol freático, que são dependentes do fator topográfico, assim, as declividades do lençol freático e da superfície dos solos são as mesmas. O fator topográfico indica a possibilidade de um ponto qualquer numa bacia atingir condições de saturação. Valores similares do fator topográfico indicam comportamento hidrológico semelhantes. A terceira suposição considera que os fluxos dentro do perfil do solo ocorrem em função do teor de umidade e da condutividade hidráulica, condicionando transmissividade da água no solo. O modelo admite que a condutividade hidráulica saturada diminui com a profundidade de maneira exponencial, afetando assim, também, de maneira exponencial a transmissividade. A quarta suposição considera que o fluxo subsuperficial é proporcional ao produto da área de contribuição com a taxa de recarga do lençol freático. A recarga do lençol freático é considerada uniforme sobre toda a área de contribuição e o escoamento subsuperficial é transmitido em direção ao longo da drenagem de toda a bacia.

Para aplicação do modelo em uma bacia uma série de informações necessita ser organizada e preparada. A Figura 5 representa um esquema das atividades de preparação das informações necessárias para a execução do modelo TOPMODEL. A montagem e preparação dos dados para bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho, estão apresentados a seguir:

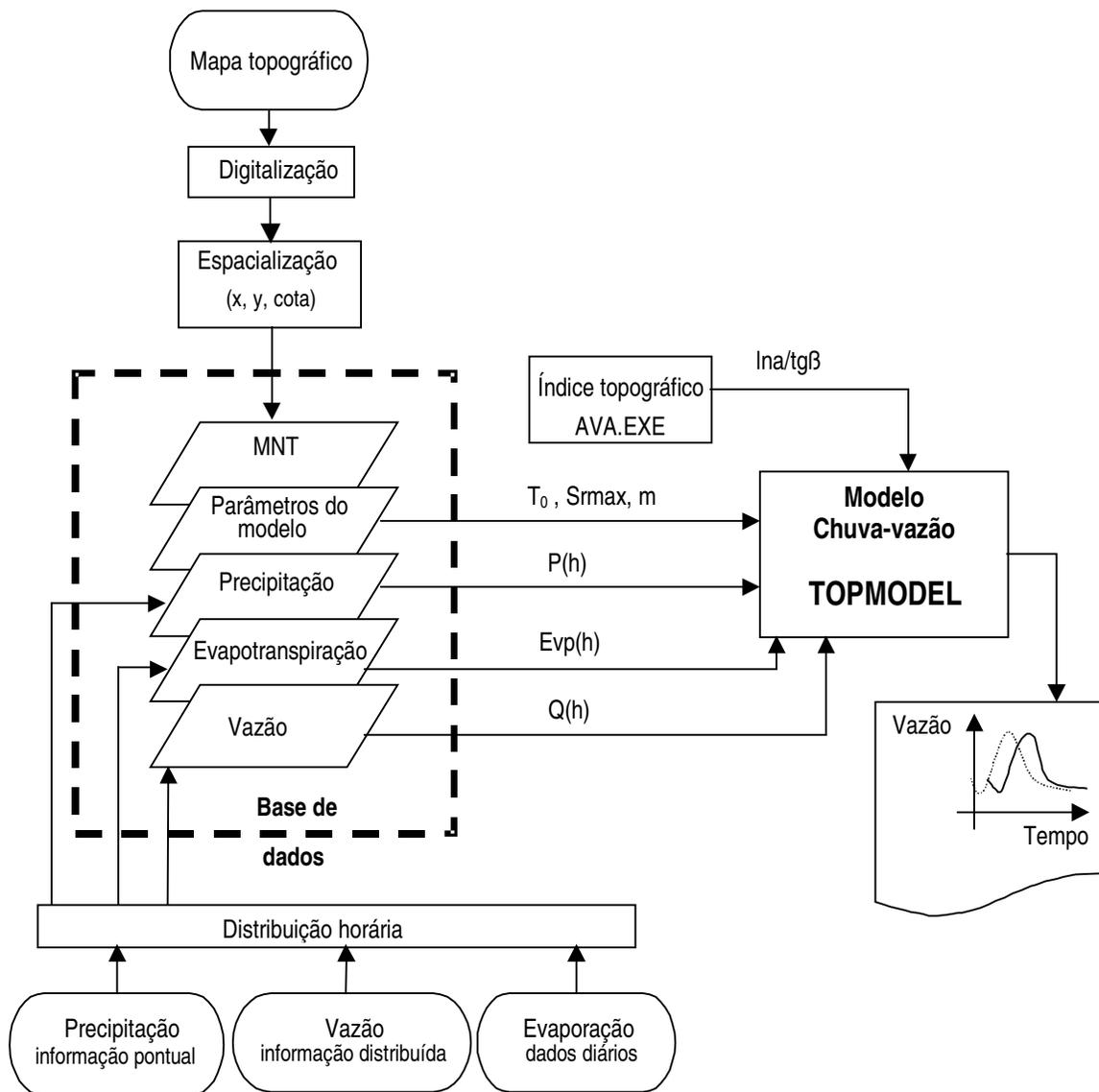


Figura 5 - Fluxograma do modelo TOPMODEL (adaptado: VARELLA e CAMPANA, 2000).

O modelo TOPMODEL considera dois reservatórios de acumulação de água na bacia, como mostra a Figura 6, que apresenta o esquema de simulação dos fluxos e dos armazenamentos para modelagem do escoamento superficial.

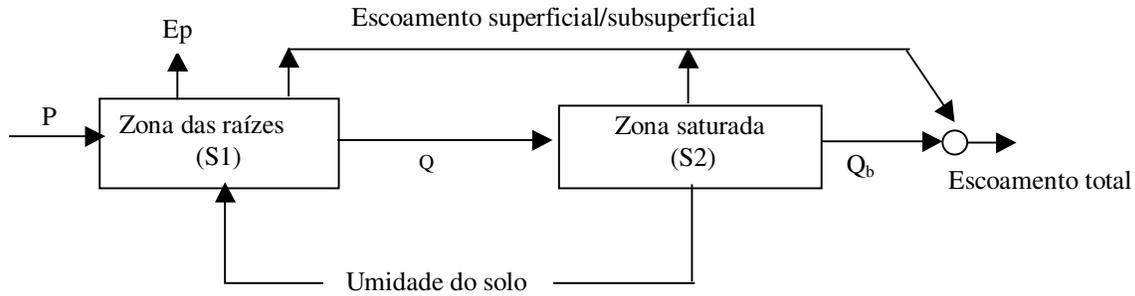


Figura 6 - Representação esquemática do balanço hídrico do solo no modelo semidistribuído TOPMODEL - adaptado de ROMANOWICZ (1997)

O reservatório S1 representa o armazenamento da zona das raízes sendo limitado em um valor máximo  $SR_{max}$ . A água nesse reservatório recebe a contribuição da precipitação e do reservatório da zona saturada (S2). Os fluxos de água de saída condicionam a evaporação e o escoamento superficial. A água do reservatório evapora na taxa potencial até o instante que o armazenamento seja nulo. O reservatório S1 contribui para o escoamento superficial no instante que a zona das raízes atinge a saturação. Valores de umidade acima da capacidade de campo produzem um fluxo de água que drena por gravidade em direção ao reservatório S2. No reservatório S2 tem-se a formação do escoamento subsuperficial relacionado de maneira não linear com a quantidade armazenada em um determinado instante.

O esquema da Figura 6 está condicionado a declividade local, a espessura do solo e a condutividade do solo. Esses fatores determinam a capacidade do solo em transmitir a água de um ponto qualquer da vertente para outro adjacente até o canal de drenagem.

O escoamento no ponto de saída da bacia é a soma do escoamento superficial das áreas saturadas e do escoamento subsuperficial:

$$q = q_s + q_b \quad (1)$$

Sendo:  $q$  – escoamento total (m)

$q_s$  – escoamento superficial (m)

$q_b$  – escoamento subsuperficial (m)

A contribuição das áreas para o escoamento superficial depende das regiões onde já ocorre a saturação (Equação 2).

$$q_s = \frac{A_s}{A} * p + q_r \quad (2)$$

Sendo:  $A$  – área da encosta que drena até a seção considerada ( $m^2$ );

$A_s$  – área saturada da encosta ( $m^2$ );

$p$  – precipitação não interceptada (m);

$q_r$  - escoamento de retorno (m)

O escoamento subsuperficial num ponto  $i$  da bacia é descrito pela equação a seguir:

$$q_i = T(z_i) * tg\beta \quad (3)$$

Sendo:  $T(z_i)$  – transmissividade do solo ( $m^2/h$ ), é definida pelo produto da condutividade hidráulica pela profundidade do solo (declividade do lençol freático igual declividade da superfície do solo).

$tg\beta$  - declividade na superfície no ponto  $i$ .

O modelo considera que a condutividade hidráulica saturada diminui exponencialmente com a profundidade do solo, então:

$$K_s(z) = K_o * e^{(-f \cdot z)} \quad (4)$$

Sendo:  $K_s(z)$  – condutividade hidráulica saturada na profundidade  $z$  do perfil considerado (m/s). A profundidade  $z$  é adotada constante para toda a área da bacia;

$K_o$  – condutividade hidráulica saturada à superfície (m/s);

$f$  – fator de decaimento, que condiciona a taxa de diminuição de  $K$  com a profundidade ( $m^{-1}$ );

O valor da transmissividade é calculado integrando-se a condutividade hidráulica saturada:

$$T_i(z_i) = \int_{z_i}^z K_o * e^{(-f \cdot z)} dz \quad (5)$$

Assim, tem-se que a transmissividade pode ser escrita como:

$$T_i(z_i) = \frac{K_o}{f} [\exp(-fz_i) - \exp(-fz)] = \frac{1}{f} [K_s(z_i) - K_s(z)] = \frac{K_o}{f} [\exp(-f \cdot z_i)] \quad (6)$$

Considerando que a profundidade  $z$  localizada abaixo do nível do lençol freático, o termo  $K_s(z)$ , torna-se desprezível com relação à condutividade hidráulica na profundidade  $z_i$ , então substituindo a Equação 6 em 3 tem-se:

$$q_i = \frac{K_o}{f} * tg\beta \exp(-f \cdot z_i) = T_o tg\beta \exp(-f \cdot z_i) \quad (7)$$

Neste ponto é introduzido conceito relacionado ao armazenamento de água no solo. A quantidade de água necessária para saturar o reservatório do solo é expressa pelo conceito do déficit de armazenamento ( $S$ ). No ponto  $i$  o déficit local de água ( $S_i$ ) relaciona-se com a profundidade  $z_i$  pela seguinte equação:

$$S_i = (\theta_{sat} - \theta_{cc}) * z_i \quad (8a)$$

$$\Delta\theta_g = \theta_{sat} - \theta_{cc} \quad (8b)$$

$$S_i = \Delta\theta_g * z_i \quad (8c)$$

Sendo:  $S_i$  – déficit de umidade (m);

$\theta_{sat}$  – teor de umidade do solo saturado (umidade de saturação);

$\theta_{cc}$  – teor de umidade na capacidade de campo.

#### 4.1.3 - Área de acumulação de água - Índice Topográfico

No decorrer de um evento de chuva, a rede de drenagem recebe a água que se transfere dos pontos mais altos em direção as baixadas do relevo. Fluxos de água superficiais e subsuperficiais se acumulam nas proximidades da drenagem aumentando a umidade destas

parcelas. Essas áreas, que concentram água durante o evento de chuva, são denominadas áreas de afluência variáveis, que representam as áreas de acumulação de água no relevo. Para a determinação dessas áreas de saturação, o modelo TOPMODEL utiliza o índice topográfico. Assim, os valores de índice topográfico são calculados segundo a equação 9.

$$IT = \ln(ac_i / tg\beta) \quad (9)$$

Sendo:  $ac_i$  - área de drenagem a montante que contribui com o escoamento de dada célula por unidade de comprimento;

$tg\beta$  - declividade local da célula

O índice topográfico é determinado pelo modelo por meio de algoritmo desenvolvido por QUINN et al. (1995). O algoritmo calcula um valor de área de drenagem ( $ac_i$ ) para cada célula, em função de informações obtidas no modelo numérico do terreno, dimensão e declividade da parcela, e direção de fluxo. Em cada célula a água pode ter nove posições, sendo que oito direções de fluxo de água são possíveis, quando se considera a movimentação da água de cada célula para sua adjacente. A Figura 7 representa a possibilidade das direções de fluxo de uma célula para sua adjacente. A direção do fluxo será definida pela declividade da célula predominante.

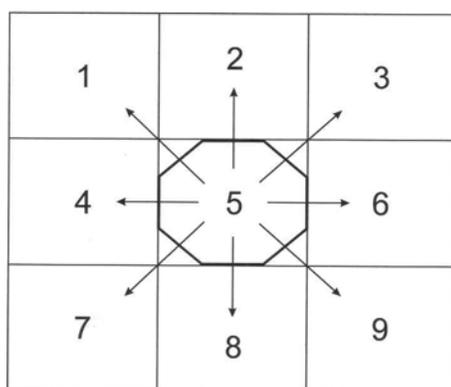


Figura 7 - Algoritmo de múltipla direção de fluxos

As células com mesmo valor de índice topográfico mostram comportamento hidrológico semelhante. Os maiores valores de índice indicam maior probabilidade de acumulação e estão associados principalmente aos fundos dos vales e canais dos rios.

#### 4.1.4 - Materiais utilizados

Os principais materiais utilizados para a execução do trabalho foram: documentação cartográfica, dados hidrológicos, dados meteorológicos e equipamentos/software:

a) Documentação cartográfica

Cartas Planialtimétricas do Plano Cartográfico do Estado de São Paulo, na escala 1:10.000 (com curvas de nível equidistantes de 5 m). Folhas utilizadas: Mato Alto, Sete Barrocas e Bairro Volta Grande (Datum Horizontal: Córrego Alegre; Projeção Universal Transversa de Mercator - Zona – 23 S) (Tabela 2).

Tabela 2- Relação das Cartas Planialtimétricas na escala 1:10.000, do Plano cartográfico do Estado de São Paulo da bacia do ribeirão dos Marins seção Monjolinho.

Folha	Nomenclatura	Código da folha	Ano
Mato Alto	SF-23-Y-A-IV-4-NO-E	075/088	1977
Sete Barrocas	SF-23-Y-A-IV-4-NO-C	074/088	1977/78
Bairro Volta Grande	SF-23-Y-A-IV-4-NO-A	073/088	1977/78

Fotografias aéreas coloridas, escala 1:30.000, voo BASEFOTO, folha SF – 23-Y-A-IV nº 68, agosto de 2000.

Levantamento Pedológico Semidetalhado do Estado de São Paulo: Quadrícula de Piracicaba – SP (mapa de solos na escala 1:100.000, juntamente com o respectivo memorial descritivo), realizado por OLIVEIRA e PRADO (1987). Boletim Científico nº 48 do IAC (OLIVEIRA et al., 1999), e o banco de dados do Projeto Piracena (PIRACENA, 2002). Foi realizada a atualização da nomenclatura e simbologia de acordo com OLIVEIRA et al.(1999).

Os dados hidrológicos para a área de estudo referem-se à série do período de dezembro a janeiro de 1999 e de 2000, oriunda da base de dados do Departamento de Águas e

Energia Elétrica – DAEE. A listagem dos postos pluviométricos e fluviométrico, com suas respectivas identificações, encontra-se nos itens 3.2.4.1 e 3.2.4.2.

b) Equipamentos/software

. Global Position System (GPS)

. Softwares utilizados:

- SURFER, versão 6.0;

- AutoCAD, versão 2000;

- IDRISI, versões 32;

- EXCEL – 97;

- Aplicativo DXFCON (conversor do formato altimetria – DXF para texto – XYZ),

de acordo com SANTOS (1998);

- Programa AVA. EXE (ZAKIA, 1998)

## **4.2. Métodos**

### **4.2.1. Relevo da Bacia do Ribeirão dos Marins seção Monjolinho**

A representação do relevo da bacia foi realizada utilizando como base as cartas topográficas planialtimétricas na escala 1:10.000, do Plano Cartográfico do Estado de São Paulo – Secretaria de Economia e Planejamento, do Governo do Estado de São Paulo de 1977/1978. A área da Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho, abrange uma região contida nas cartas topográficas apresentadas na Tabela 2.

Nessas cartas foram extraídas as informações relativas à hidrografia, e à topografia (curvas de nível e pontos culminantes) para montagem dos planos de informação importantes (declividades e índice topográfico). As cartas foram passadas para o formato digital em “scanner” de rolo, depois a hidrografia e as curvas de nível foram digitalizadas por meio do programa AUTOCAD (versão 2000). Nesta etapa também foi determinado o comprimento do canal principal. O plano de informação, com as curvas de nível no formato DXF, foi convertido para o formato ASCII utilizando o aplicativo DXFCON (SANTOS, 1998). No programa SURFER (versão 6.01), este arquivo foi importado para executar sua interpolação pelo método da curvatura mínima, obtendo-se o modelo numérico do terreno (MNT). Os arquivos foram exportados para o Sistema de Informação Geográfica – IDRISI for Windows,

v.32 (EASTMAN, 2000), compondo o plano de informação de relevo que foi utilizado para caracterização dos dados na escala espacial.

Para a elaboração do modelo numérico do terreno (MNT), derivado das cartas topográficas, foram escolhidos quatro tamanhos de células: 30x30m; 50x50m, 70x70m e 100x100m. O tamanho de célula utilizado no MNT tem efeito direto na simulação do modelo TOPMODEL, em especial no cálculo da área de afluência variável (QUINN et al., 1995; SAULNIER, 1996; SAULNIER, et al. 1997). Outro ponto levado em conta, na determinação do tamanho de célula, foi às limitações impostas pelo TOPMODEL.

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

#### **4.2.2 - Divisor de águas da Bacia do Ribeirão dos Marins seção Monjolinho**

A definição do divisor de águas, referente à seção Monjolinho, foi utilizado um traçado manual nas cartas topográficas. A seção Monjolinho representa o exutório da bacia. Essa seção está localizada no Ribeirão dos Marins a 50m a montante da ponte da rodovia PI-40 (Figura 8). Assim, essa bacia será denominada de bacia hidrográfica Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho. Na seção do exutório da bacia foi construído um vertedor para controlar os fluxos de água. Essa estrutura foi fundamental para determinação das vazões na bacia (Figuras 8 e 9).

#### **4.2.3 - Uso e ocupação das terras bacia do Ribeirão dos Marins seção Monjolinho**

O levantamento do uso e ocupação das terras da área foi realizado a partir de fotografias aéreas coloridas da Coordenadoria de Assistência Técnica Integral (CATI). Os dados representados nas fotos foram complementados com observações de campo realizadas no ano de 2001. Nas observações de campo os diversos usos e ocupação na bacia foram delimitados com auxílio do GPS. Além da identificação procurou-se identificar os padrões da

vegetação, grau de desenvolvimento das culturas e informações gerais de manejo das culturas para melhor compreensão e classificação da ocupação das terras.

#### **4.2.4 - Caracterização do meio físico da bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho**

A caracterização do meio físico foi realizada utilizando planos informações como: unidades de solo, o uso e ocupação das terras e as classes de declividade do relevo da bacia. Essas informações são importantes para se determinar às áreas de maior potencial de formação de escoamento. Todos esses planos foram relacionados procurando melhor conhecer as características da bacia em estudo.

#### **4.2.5 - Dados de entrada do modelo TOPMODEL**

Para utilização do modelo TOPMODEL são requeridos como dados de entrada: chuva, evapotranspiração potencial, vazão e modelo numérico do terreno (MNT) (Figura 5). O modelo considera cinco parâmetros de entrada: armazenamento exponencial, transmissividade, capacidade máxima de armazenamento de água na zona das raízes, armazenamento inicial do solo e velocidade do canal. Analisando a disponibilidade de dados da bacia selecionou-se o período de janeiro de 1999 a dezembro de 2000 para a aplicação do modelo. Esse período foi considerado em função de estudos de consistência de dados já realizado por MORETTI (2001).

##### **4.2.5.1 - Precipitação**

A medida de chuva na bacia foi realizada a partir de dois pluviógrafos e quatro pluviômetros. A localização dos postos pode ser vista na Tabela 4 e na Figura 8 mostra sua posição na bacia.

Para a simulação consideram-se apenas os registros dos pluviógrafos. Os dados dos pluviômetros não foi possível utilizar em função da incompatibilidade dos intervalos de medidas da chuva e de simulação do modelo. Os dados de chuva nos pluviógrafos são registrados em intervalos de quinze minutos. Estes valores foram integrados em intervalos

horários. Para determinação da chuva na bacia considerou-se a média aritmética dos valores horários observados nos pluviógrafos.

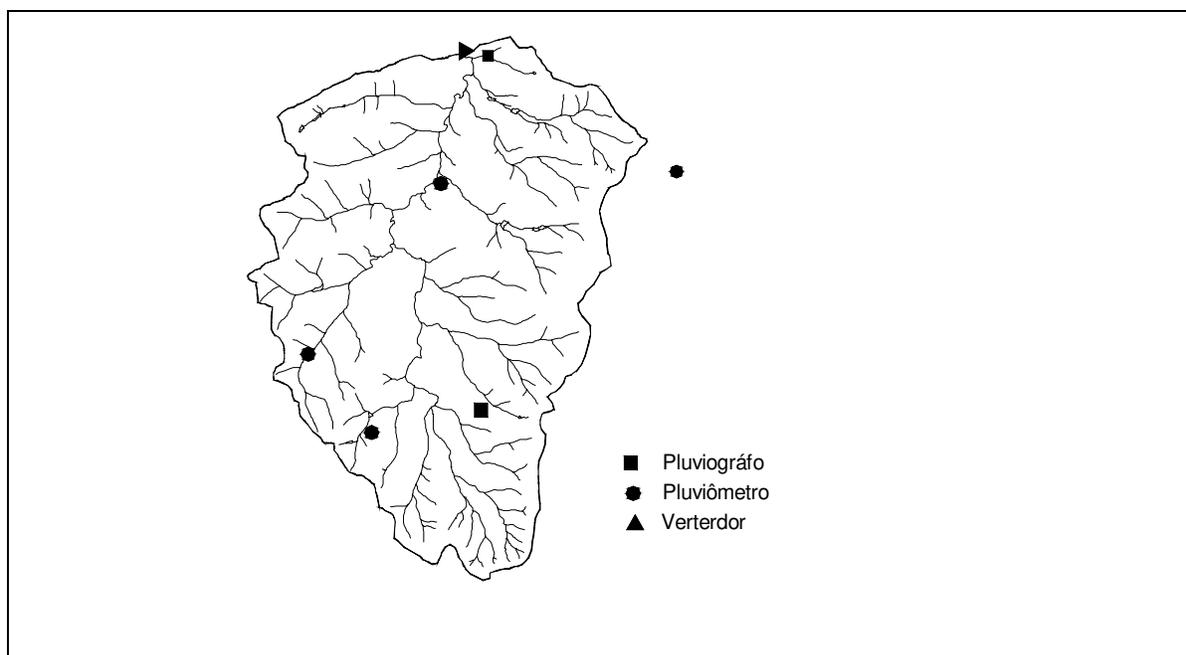


Figura 8 - Localização dos pontos de medidas de precipitação e vazão na bacia do Ribeirão dos Marins seção Monjolinho – Piracicaba-SP.

Tabela 3- Coordenadas dos postos pluviométricos na bacia do Ribeirão dos Marins seção Monjolinho – Piracicaba-SP

Prefixo	Posto	Coordenadas	
		Latitude	Longitude
D4-113	Monjolinho A	22 <sup>0</sup> 49'25'' S	47 <sup>0</sup> 43'38'' W
D4-114	Monjolinho B	22 <sup>0</sup> 48'52'' S	47 <sup>0</sup> 44'05'' W
D4-115	Monjolinho C	22 <sup>0</sup> 47'40'' S	47 <sup>0</sup> 41'20'' W
D4-116R	Monjolinho D	22 <sup>0</sup> 46'49'' S	47 <sup>0</sup> 42'45'' W
D4-117	Monjolinho E	22 <sup>0</sup> 47'43'' S	47 <sup>0</sup> 43'05'' W
D4-118R	Monjolinho F	22 <sup>0</sup> 49'15'' S	47 <sup>0</sup> 42'52'' W

#### 4.2.5.2 - Vazão na bacia do Ribeirão dos Marins seção Monjolinho

A vazão foi medida na estação fluviométrica (4D - 006) localizada na saída da seção Monjolinho (Figura 8). A estação foi instalada em 1998 pelo Departamento de Água e Energia Elétrica (DAEE). O controle hidráulico da estação é realizado por um vertedor tipo crista curta desenvolvido pelo “U.S. Soil Conservation Service”, denominado “V-notch weir sill”, com

inclinação da crista de 1:3 (vertical/horizontal). Esta estrutura foi desenvolvida para uso em áreas rurais e apresenta tabela de vazões determinada empiricamente para três inclinações laterais diferentes: 1:2, 1:3 e 1:5 (MORETTI, 2001). A cota é medida por sensor de nível e registrada em armazenador eletrônico de dados. Os níveis são lidos todos os dias, em dois instantes, com auxílio de uma série de réguas linimétricas, assim, permitindo o controle dos dados registrados (Figura 9 e 10). Os dados dos níveis de água são convertidos em valores de vazão utilizando uma curva-chave.

A curva de descarga (curva-chave) do vertedor foi definida em função dos níveis de água sobre a estrutura vertente. Assim, foram consideradas duas condições: funcionamento livre e com submergência. As equações definidas e utilizadas pelo Departamento de Água e Energia Elétrica para calcular o valor das vazões são apresentadas a seguir:

Leitura da régua linimétrica ( $h_m$ em metros)	Equação da curva chave ( $Q$ em $m^3/s$ )	
Funcionamento livre		
$h_m < 1,24m$	$Q_1 = 0,00182 * h_m^{20,53}$	(10)
$1,24 \leq h_m \leq 1,92 m$	$Q_2 = 0,0303 * h_m^{7,516}$	(11)
$h_m > 1,92$	$Q_3 = 0,133 * h_m^{5,247}$	(12)
Submergência <sup>(1)</sup>		
$h_m < 1,24 m$	$Q_1 = f * 0,00182 * h_m^{20,53}$	(13)
$1,24 m \leq h_m < 1,92 m$	$Q_2 = f * 0,0303 * h_m^{7,516}$	(14)
$1,92 m \leq h_m < 1,99 m$	$Q_3 = f * 0,133 * h_m^{5,247}$	(15)
$1,99 m \leq h_m < 3,01 m$	$Q_4 = 3,12 * \left[ \frac{(h_m - 0,835)}{0,786} \right]^{1,067}$	(16)
$3,01 m \leq h_m < 3,20 m$	$Q_5 = 3,12 * \left[ \frac{(h_m + 0,09)}{1,114} \right]^{1,067}$	(17)
$h_m > 3,20 m$	$Q_6 = 0,233 * \left[ \frac{(h_m + 0,09)}{1,114} \right]^{3,493}$	(18)

<sup>(1)</sup> O vertedor funciona livre até 0,30m. Para valores de  $S \leq 0,301$ ,  $f = 1$  e para  $S \geq 0,99$ ,  $f = 0,15$ . Para  $h_j$  até 1,18 m não haverá necessidade de registro do nível d'água de jusante, pois a vazão será calculada apenas com base na leitura da régua de montante ( $h_m$ ), (MORETTI, 2001).

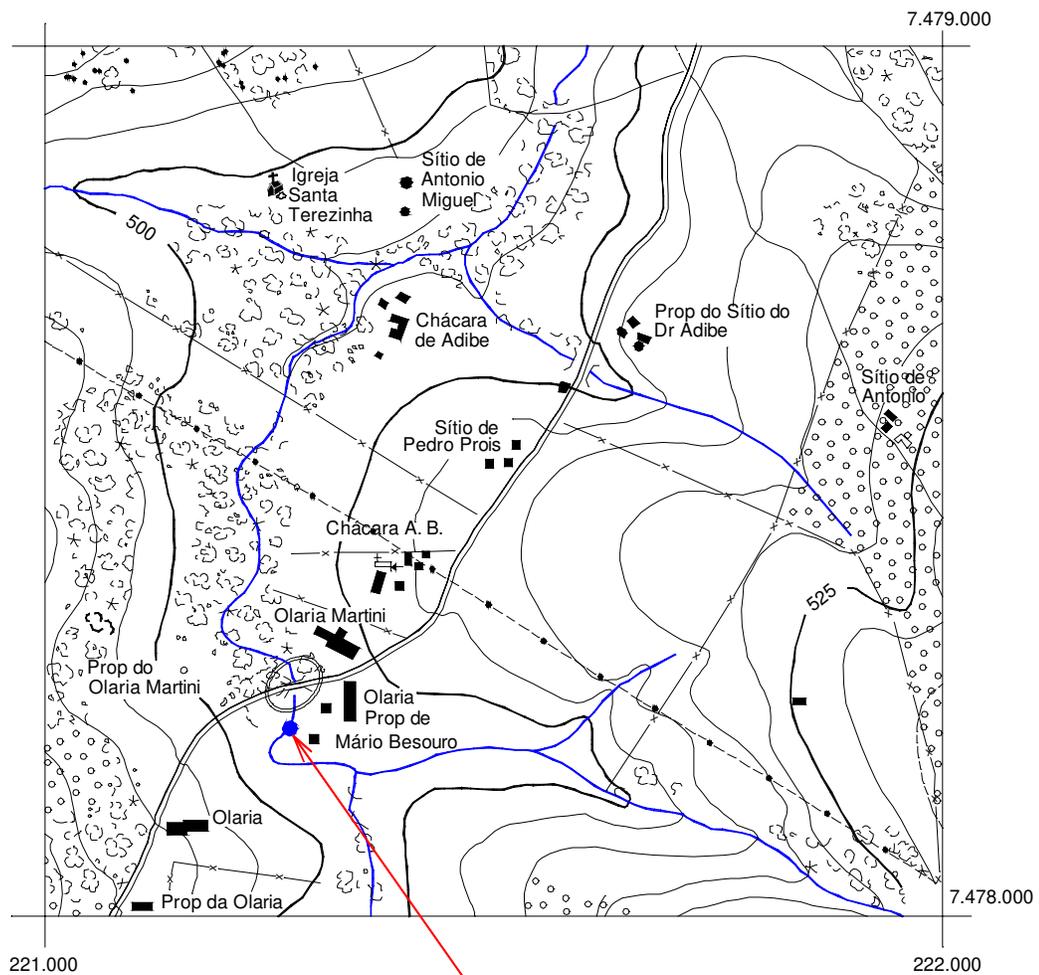


Figura 9 - Localização da estação fluviométrica (4D - 006) na saída da bacia do Ribeirão dos Marins seção Monjolinho – Piracicaba-SP

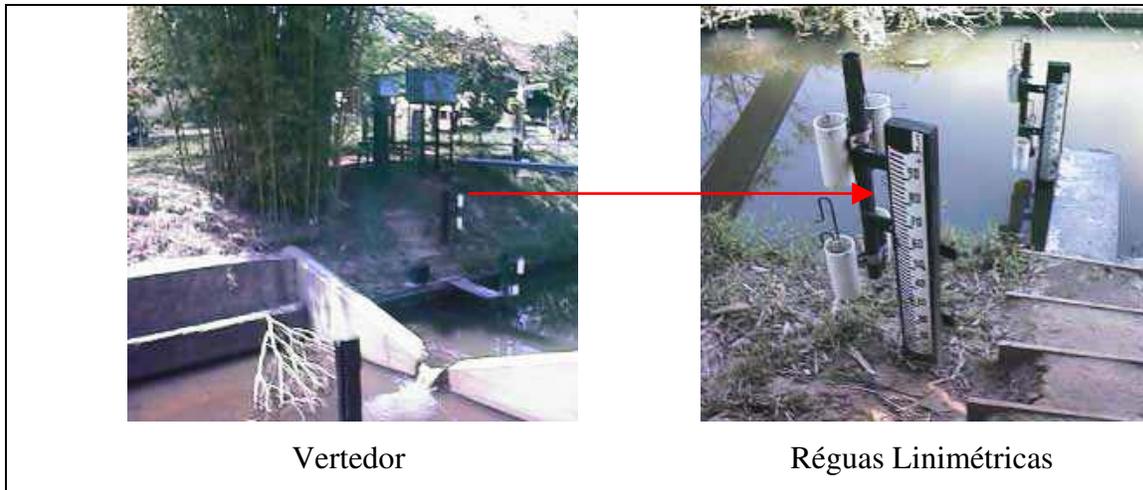


Figura 10 - Vista da estação fluviométrica 4D-006 instalada no exutório da bacia do Ribeirão dos Marins seção Monjolinho

#### 4.2.5.3 - Evapotranspiração Potencial

Na modelagem da evapotranspiração potencial foram utilizados dados da estação automática do Posto Meteorológico da ESALQ/USP, localizado nas coordenadas 22°44'30" de latitude sul e 47°38'00" de longitude oeste, a 546 m de altitude. Com esses dados diários coletados na estação meteorológicos da estação, calculou-se a evapotranspiração potencial pelo método de Penman-Monteith -Padrão FAO/1998 de acordo com PEREIRA et al. (2002), pela seguinte equação:

$$ETP = \frac{0,408 s (Rn - G) + \frac{\gamma 900 U_2 (e_s - e_a)}{T + 273}}{s + \gamma (1 + 0,34 U_2)} \quad (19)$$

Sendo:  $ETP$  – evapotranspiração potencial ( $\text{mm} \cdot \text{dia}^{-1}$ );

$s$  – declividade da curva de pressão de vapor na temperatura do ar, em  $\text{kPa} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$

$Rn$  – radiação líquida total diária ( $\text{MJ} \cdot \text{M}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ );

$G$  – fluxo de calor no solo ( $\text{MJ} \cdot \text{M}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ );

$\gamma$  – constante psicrométrica =  $0,063 \text{ kPa} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ;

$U_2$  – velocidade do vento a 2m de altura ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ );

$e_s$  – pressão de saturação de vapor (kPa);

$ea$  – pressão parcial de vapor (kPa);

$T$  - temperatura média do ar ( $^{\circ}\text{C}$ ).

Os dados calculados de evapotranspiração potencial diária foram distribuídos no tempo segundo um modelo de distribuição senoidal (VARELLA e CAMPANA, 2000 e RANZINI, 2002). Para a distribuição dos valores de ETP diária ao longo do tempo considerou-se a duração média de 12 horas do dia. Esse período de 12 horas foi considerado o intervalo de 7:00 e 19:00 horas e representado matematicamente por um intervalo de 0 a  $\pi$ , respectivamente. O modelo utiliza a função seno para distribuição dos valores de ETP ao longo do dia. Esse modelo foi aplicado no período de 1999 e 2000.

#### **4.2.5.4 - Influência da resolução espacial no cálculo do Índice Topográfico**

As quatro resoluções (tamanhos de células – 30x30m, 50x50m, 70x70m e 100x100m) foram utilizadas para a construção dos modelos numéricos do terreno. Essas resoluções foram aplicadas no programa AVA.EXE (ZAKIA, 1998) para a determinação do índice topográfico. A influência dos tamanhos de células no índice topográfico será estudada utilizando a distribuição de frequências dos valores índice para as diferentes resoluções. Outra relação realizada no estudo da distribuição do índice topográfico foi sua relação com a ocupação da área de acumulação em função da área total da bacia.

#### **4.2.5.5 - Estimativa dos parâmetros de entrada**

O processo de calibração do modelo necessita a explicitação de cinco parâmetros. Nesse processo verifica-se qual o melhor grupo de valores dos parâmetros que representam as características da bacia hidrográfica. Inicialmente foi determinado um grupo de valores dos parâmetros para as primeiras simulações da bacia.

##### **a) Armazenamento exponencial – $m$**

O parâmetro  $m$  foi obtido pela análise das curvas de recessões das vazões. A determinação do parâmetro é realizada a partir do gráfico do inverso da vazão de base em

função do tempo. Admite-se que o inverso da vazão pode ser descrito por uma equação de primeira ordem com o tempo (Equação 20). A Equação 20 mostra que o coeficiente angular da reta é igual a  $1/m$ .

$$\frac{1}{Q_b} = \frac{1}{Q_o} + \frac{t}{m} \quad (20)$$

Para determinação do parâmetro  $m$  foram selecionados 12 eventos de recessão do posto 4D-006. Esses eventos foram escolhidos procurando condições diferentes ao longo da série dos dados de vazão. A partir da análise de todos os eventos foi possível determinar uma faixa de variação do valor do parâmetro  $m$  para ser aplicado na simulação do modelo.

**b) Transmissividade lateral saturada –  $T_o$ , o déficit de armazenamento máximo da zona das raízes –  $S_{ZR\ max}$  e o déficit inicial de umidade da zona radicular -  $S_{Zro}$ .**

Esses parâmetros foram calculados a partir das características físico-hídricas dos solos presentes na bacia do ribeirão dos Marins seção Monjolinho. Os dados para a preparação das informações necessárias foram extraídos do banco de dados do Projeto Piracena (PIRACENA 2002) e do Boletim Científico n<sup>o</sup> 48 do Instituto Agrônomo de Campinas (IAC) (OLIVEIRA et al.,1999 e OLIVEIRA e PRADO, 1987).

O parâmetro transmissividade lateral saturada à superfície ( $T_o$ ) foi determinado pelo produto da condutividade hidráulica saturada à superfície e o parâmetro  $m$ . A condutividade hidráulica foi calculada pela equação de RAWLS e BRAKENSIEK (1985).

O déficit de armazenamento máximo da zona das raízes ( $S_{ZR\ max}$ ) foi calculado a partir dos valores de capacidade de campo, ponto de murcha permanente, e teor de água disponível obtidos conforme as equações de ASSAD et al. (2001) e valores da porosidade do solo. Este parâmetro foi calculado considerando a profundidade do sistema radicular no solo de 1 m.

Para o parâmetro déficit inicial de umidade da zona radicular ( $S_{Zro}$ ) foi considerado uma porcentagem (40%) de  $S_{ZR\ max}$  conforme SCHULER (1998).

### **c) Velocidade de propagação do escoamento no canal - CHV**

A velocidade de propagação do escoamento no canal foi calculada considerando o intervalo de tempo entre o instante que ocorre uma chuva intensa, no posto pluviométrico mais distante da saída, e o instante da resposta quando ocorre a vazão máxima. Para fazer esses cálculos foram escolhidos eventos de precipitação que ocorriam na cabeceira da bacia (D4-118R) e não ocorriam na estação próxima da saída da bacia (D4-116R). O cálculo do valor da velocidade de propagação do escoamento está explicitado no Apêndice A.

#### **4.2.5.6 - Escolha dos eventos para simulação do modelo TOPMODEL**

No processo de simulação do modelo foram escolhidos eventos no período de 1999 - 2000. Para escolha dos eventos foram adotados dois critérios fundamentais: os eventos de chuva cujas precipitações devem proporcionar alterações nas vazões; e o intervalo de tempo entre o evento de chuva e a resposta no fluxo de água no canal deve atender as condições do tempo de concentração da bacia. A partir desse critério foram selecionados 28 eventos, que foram repartidos nos processos de calibração e validação. Destes eventos, aqueles selecionados para o processo de calibração foram agrupados em função das chuvas totais médias dos eventos na bacia. Esse agrupamento teve como objetivo melhor compreender o efeito dos eventos de chuva na bacia. Para determinação da chuva na bacia considerou-se a média aritmética dos valores horários observados nos pluviógrafos.

#### **4.2.6 - Calibração do modelo TOPMODEL**

No processo de calibração foram escolhidos 12 eventos dos 28 selecionados. Os eventos foram escolhidos ao acaso dentro de cada grupo, totalizando quatro por grupo.

A calibração do modelo foi obtida ajustando-se manualmente os valores dos parâmetros encontrados teoricamente. Nesse processo, procurou-se um grupo de parâmetros, que representasse a melhor concordância entre a hidrógrafa observada e a simulada, considerando todos os eventos escolhidos para calibração.

No exercício da calibração foi observado o comportamento dos cinco parâmetros de entrada quanto a sua sensibilidade. Isto é, a variabilidade dos valores da hidrógrafa simulada

em função da variação isolada de cada parâmetro. A determinação da sensibilidade dos parâmetros foi fundamental para compreender a estrutura de simulações do modelo.

#### **4.2.7 - Validação do modelo TOPMODEL**

Para a validação do modelo foi utilizado o conjunto de parâmetros que melhor se ajustou aos eventos utilizados no processo de calibração. Do total de eventos, selecionados para simulação, dezesseis restantes foram utilizados no processo de validação.

O processo de validação do modelo TOPMODEL foi executado segundo dois procedimentos. O primeiro foi realizado considerando os valores dos parâmetros obtidos no processo de calibração (simulação 1). O segundo foi efetuado incorporando uma relação nova entre o parâmetro mais sensível e a precipitação média do intervalo do agrupamento dos eventos no processo de calibração (simulação 2). Assim, a estimativa do valor do parâmetro mais sensível foi determinada a partir dessa relação. Esse procedimento poderia permitir uma melhor estimativa desse parâmetro. Os valores dos outros parâmetros foram considerados os mesmos obtidos do processo de calibração.

## **5. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **5.1. Diagnóstico da Bacia do Ribeirão dos Marins seção Monjolinho**

#### **5.1.1. Relevo Bacia do Ribeirão dos Marins seção Monjolinho**

As cartas topográficas planialtimétricas na escala 1:10.000, do Plano Cartográfico do Estado de São Paulo, foram as informações básicas para definir os modelos numéricos de terrenos em quatro resoluções diferentes. A Figura 11 mostra o modelo numérico do terreno elaborado para diversos tamanhos de células, 30, 50, 70 e 100 m. As altitudes da região, em que se encontra a bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho, variam entre 480 m a 620 m aproximadamente. Analisando o modelo numérico do terreno, em especial, na resolução de 30m, observa-se que em 60% da área total da bacia predominam as altitudes entre 520 e 560 m, as altitudes inferiores a 500 m são encontradas em 1,1%, enquanto as superiores a 600 m correspondem a 15%.

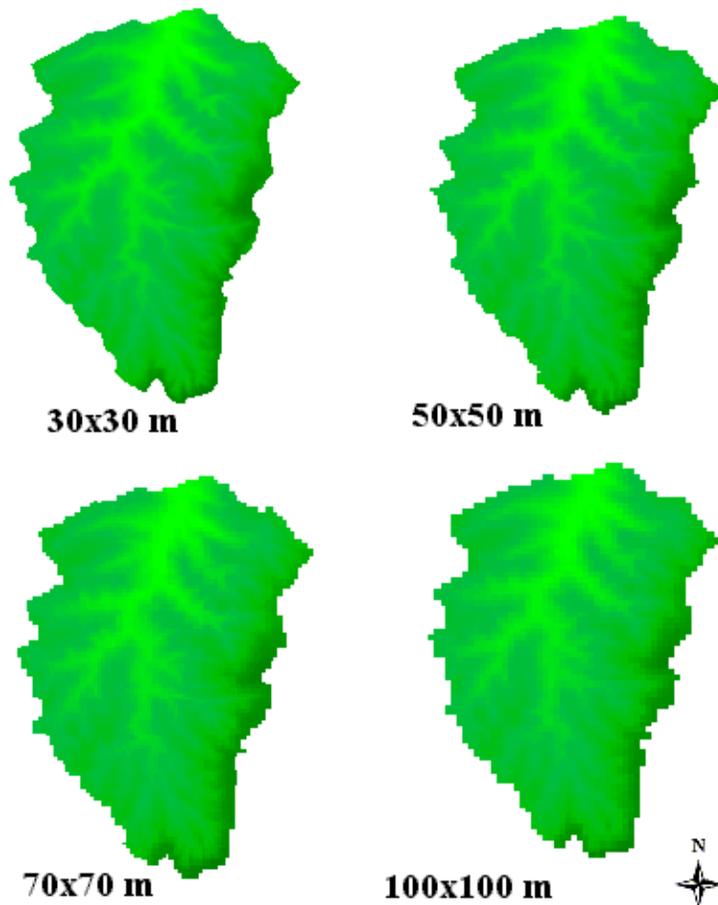


Figura 11 - Modelos numéricos do terreno (MNT) na bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho, com tamanhos de células de 30x30 m, 50x50 m, 70x70 m e 100x100 m, obtidos a partir das cartas topográficas planialtimétricas na escala 1:10.000, do Plano Cartográfico do Estado de São Paulo – Secretaria de Economia e Planejamento, do Governo do Estado de São Paulo de 1977/1978, referentes as folhas Bairro Volta Grande, Mato Alto e Sete Barrocas.

### 5.1.2. Uso e ocupação da terra na Bacia do Ribeirão dos Marins seção Monjolinho

A Figura 12 e a Tabela 4 relacionam as categorias de uso e ocupação das terras da bacia e suas respectivas áreas de ocorrência. A Figura 12 mostra o plano de informação do levantamento de uso e ocupação do solo, determinado a partir de informações obtidas por fotografias aéreas coloridas, e complementado com observações de campo. Nessa figura pode-se verificar que na bacia predomina a cultura de cana-de-açúcar com, aproximadamente, 52% da área total (1146,2 ha). Os levantamentos de campo realizados mostraram que a área de

cultura de cana-de-açúcar apresentava diversos estágios de desenvolvimento. Na área restante da bacia (47%) a ocupação é representada por pastagem (514,2 ha), reflorestamento (11,8 ha), zona urbana (34,9 ha) e matas ciliares e capoeiras (427,5 ha). Nas áreas próximas aos canais de drenagem foi verificada, em campo, a presença marcante de processos erosivos, onde praticamente muito pouco de mata ciliar (6.3%) se faz presente (Figura 12).

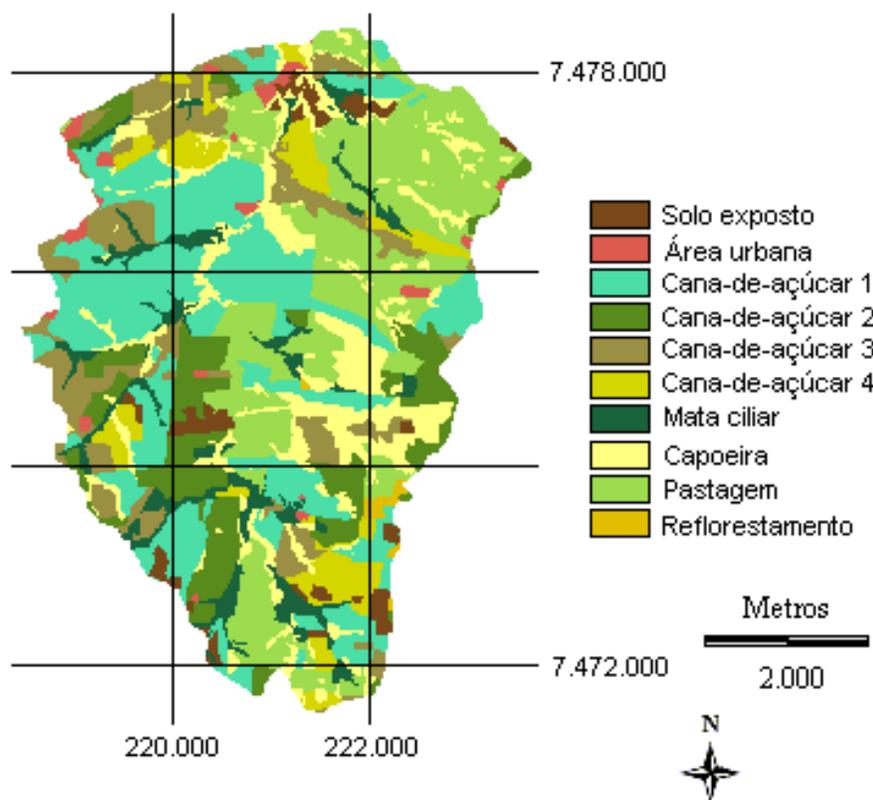


Figura 12 - Plano de informação do uso da terra na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho, no ano de 2001, obtido a partir de fotografias aéreas coloridas na escala 1:30.000, vô BASEFOTO, folha SF – 23-Y-A-IV n<sup>o</sup> 68, agosto de 2000 e observações de campo realizadas no ano de 2001. Os números seguidos de cana-de-açúcar são referentes aos estágios de desenvolvimento no ano de 2001: 1- em formação; 2 – madura; 3 – plantio; 4 – soca.

Tabela 4- Uso e ocupação da terra na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho, obtida a partir de fotografias aéreas coloridas na escala 1:30.000, voo BASEFOTO, folha SF – 23-Y-A-IV n<sup>o</sup> 68, agosto de 2000 e observações de campo realizadas no ano de 2001.

Uso/ocupação	Área	
	(ha)	(%)
Cana-de-açúcar	1146,2	52,1
Pastagem	514,2	23,4
Reflorestamento	11,8	0,5
Capoeira	289,2	13,1
Mata ciliar	138,3	6,3
Área urbana	34,9	1,6
Solo exposto	67,3	3,0
Total	2201,9	100,0

MORETTI (2001) apresentou uma distribuição de uso/ocupação para a Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho, para o ano de 1999. O autor encontrou uma ocupação para cultura de cana-de-açúcar de 46,9%. Verifica-se, portanto, que ocorreu um avanço da área plantada com cana-de-açúcar de 5% para o período de dois anos. Comparando-se com o levantamento de MACHADO (2002), para toda a Bacia do Ribeirão dos Marins (59 km<sup>2</sup>), verifica-se que 35% da cultura de cana-de-açúcar de toda a bacia se encontram na região da Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho, 8,5% da vegetação nativa, 15% da pastagem e menos de 1% da área urbana. Assim, pode-se observar que a região da bacia da seção Monjolinho apresenta uma parcela pequena de ocupação de vegetação nativa, pastagem e área urbana. Entretanto, a porcentagem de ocupação da cultura de cana-de-açúcar é equivalente na área das bacias. Desta maneira, os resultados encontrados na região da seção Monjolinho não poderão ser expandidos para a bacia como um todo, pois considerando, somente o padrão de uso de ocupação, observa-se que este não se apresenta uniforme.

### 5.1.3. Caracterização do meio físico da bacia do Ribeirão dos Marins

Na caracterização física da bacia foram realizados cruzamentos de planos de informações referentes ao uso e ocupação, tipos de solos e declividade dos terrenos. O plano de informação resultante destes cruzamentos é mostrado no Quadro 2. O resultado do cruzamento das informações do uso e ocupação com a classe de solos mostrou que 32% da

cultura de cana-de-açúcar ocupam áreas cujos solos são argissolos. Nesses solos, 4% de sua área é ocupada com pastagem, 3% com capoeira, e menos de 1% ocupada com área urbana. Os Neossolos Litólicos representam o segundo tipo mais freqüente na bacia. Nesses solos 7% são ocupados pela cultura de cana-de-açúcar e 9% pela pastagem. A mata ciliar tem uma mesma distribuição nos Argissolos (2,3%) e nos Neossolos Litólicos (2,3%). Considerando o terceiro plano de informação, declividade dos terrenos, observa-se que 40% das áreas com a cultura de cana-de-açúcar nos solos argissolos apresentam declividade de 6-12% e 30% das áreas de declividade de 12-20%. Os terrenos com relevo moderado a forte ondulado (12-40% de declividade) ocupam 60% das áreas de neossolos e cana-de-açúcar. A mata ciliar apresenta 65% de sua ocupação nas declividades de 6-20% nos argissolos e 59% neste mesmo declive nos neossolos.

A Bacia do Ribeirão dos Marins seção Monjolinho apresenta 65% de sua área com declividade entre 6-20%, as áreas com declive maior que 40% ocorrem em aproximadamente 3 ha. Nas declividades de 6-20% concentra-se a maior parte dos argissolos, cerca de 656 ha, sendo que este solo apresenta uma área inexpressiva na declividade acima de 40%. Os Neossolos Litólicos concentram-se entre as declividades de 6-40% (454 ha), sendo que 22% da área desses solos estão em declive mais acentuado (20-40%).

KLETECKE (2003) analisou a adequação do solo utilizando a metodologia da aptidão agrícola para a bacia Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho. A autora encontrou que 47% da área era utilizada de maneira adequada, 46% estava subutilizada, principalmente nas áreas ocupadas com pastagem, enquanto que 7% tinha uma utilização acima da oferta ambiental. No entanto, a autora mencionou que essa situação de uso e ocupação da bacia não garantindo a preservação dos recursos hídricos na área, pois outros aspectos devem ser considerados, em especial, o manejo da produção agrícola.

Quadro 2 - Resultado do cruzamento entre os planos de informação do uso e ocupação da terra, das classes de declividade e das unidades taxonômicas de solo na Bacia do Ribeirão dos Marins seção Monjolino, Piracicaba-SP e suas respectivas áreas em hectares.

Uso e ocupação da terra <sup>(1)</sup>	Classe de solo <sup>(2)</sup>	Declividade (%) <sup>(3)</sup>						Total (%)
		0- 3	3 - 6	6 - 12	12 - 20	20 - 40	> 40	
		-----Área (ha)-----						
SEXP	PV	5,2	4,8	10,8	6,5	1,0	-	1,3
	RL	5,0	2,8	6,9	6,9	2,0	0,13	1,1
	Cb+RL+PV	1,2	0,8	2,8	2,4	0,7	-	0,4
	Cb	1,4	0,8	1,6	2,3	1,3	-	0,3
AU	PV	3,4	4,9	8,4	3,9	0,3	-	0,9
	RL	1,2	0,9	4,9	1,9	0,5	-	0,4
	Cb+RL+PV	0,4	0,3	0,8	0,5	0,2	-	0,1
	LV	0,6	0,5	0,7	-	-	-	0,1
CA	Cb	0,4	0,3	-	-	-	-	0,03
	PV	92,7	109,6	284,2	193,2	31,4	-	32,3
	RL	11,5	9,8	38,8	59,3	27,9	0,5	6,7
	Cb+RL+PV	20,3	26,1	81,1	73,4	19,9	0,05	10,0
MC	LV	8,8	5,5	10,6	1,7	0,2	-	1,2
	Cb	4,0	3,1	13,6	14,9	3,8	-	1,8
	PV	9,3	5,2	17,6	14,9	3,4	-	2,3
	RL	9,5	5,7	13,5	16,7	5,5	0,1	2,3
CP	Cb+RL+PV	5,5	3,2	7,8	7,3	1,8	-	1,2
	Cb	1,2	1,3	3,8	3,7	1,4	-	0,5
	PV	8,9	8,8	27,7	22,9	4,7	-	3,3
	RL	26,8	12,7	30,1	44,7	23,5	0,6	6,3
P	Cb+RL+PV	7,9	5,8	16,9	24,6	9,9	0,2	3,0
	LV	0,6	0,5	1,3	0,7	0,2	-	0,1
	Cb	1,1	0,9	2,5	3,2	1,5	-	0,4
	PV	9,1	10,1	35,3	26,2	6,4	0,1	4,0
TOTAL	RL	19,0	15,5	53,1	74,9	41,7	1,3	9,3
	Cb+RL+PV	27,8	24,6	69,4	61,1	14,6	0,1	9,0
	LV	0,4	0,4	0,5	0,4	-	-	0,1
	Cb	1,7	2,9	9,3	6,9	1,3	-	1,0
TOTAL		286,6	268,8	757,8	679,2	206,4	3,0	2201,9

<sup>1</sup> Classes de uso e ocupação: Solo exposto (SEXP), Área urbana (AU), Cana-de-açúcar (CA), Mata Ciliar (MC), Capoeira e Reflorestamento (CP), Pastagem (P), mostradas na Figura 5.

<sup>2</sup> Classes de solos: Argissolos (PV), Neossolo Litólico (RL), Associação (Cb+RL+PV) Latossolo (LV), Cambissolo (Cb), mostradas na Figura 4.

<sup>3</sup> Classes de declividade segundo CASTRO e VALÉRIO FILHO (1997).

## **5.2. Caracterização hidrológica na Bacia do Ribeirão dos Marins seção Monjolinho**

A caracterização hidrológica da bacia foi realizada utilizando, como parâmetros de base, os dados de precipitação, vazão e evapotranspiração. Os dados primários de precipitação foram obtidos a partir de observações de totais horários na bacia nas estações D4-116R e D4-118R. Para caracterização da precipitação na bacia foi considerada a média aritmética dos valores registrados nessas estações (Figura 8). Com relação aos escoamentos, na seção Monjolinho, consideraram-se os dados relativos a vazão horária determinada a partir de leituras realizadas no posto 4D-006 (Figura 8 e 9). O cálculo da evapotranspiração da bacia foi realizado utilizando-se o modelo de Penman-Monteih (PEREIRA et al., 2000) na escala diária. Os dados primários para aplicação do modelo foram obtidos na estação automática da ESALQ/USP.

### **5.2.1. Precipitação na Bacia do Ribeirão dos Marins seção Monjolinho**

#### **- Caracterização da precipitação na bacia no período 1999/2000**

A distribuição mensal da chuva na bacia para os anos 1999 e 2000 estão apresentados na Figura 13. Neste período a precipitação total na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho, foi de 1251,1 mm e 1323,0 mm para os anos de 1999 e 2000, respectivamente. Comparando estes valores totais de precipitação verifica-se, que mesmo com valores próximos, a distribuição da precipitação, durante o período 1999/2000, apresenta uma variação na escala mensal bem distinta.

A soma do total de chuva dos meses de janeiro, fevereiro e dezembro de 1999 correspondem a 63% do total anual (Figura 13). Nos meses de janeiro e fevereiro do ano de 2000 foi observado um total de chuva acima de 200 mm (Figura 13). No ano de 2000, os meses mais chuvosos, janeiro, fevereiro, março, novembro e dezembro foram responsáveis por 78% de toda a precipitação ocorrida no ano. Numa comparação entre as precipitações ocorridas mensalmente entre os dois anos (Figura 13), destaca-se o mês de janeiro de 1999 com uma precipitação 36% superior do mês de janeiro de 2000. Nos meses de julho e agosto de 1999 não foi verificada nenhuma precipitação, o mesmo ocorrendo em maio e abril de

2000. No mês de junho de 2000, observou-se valores inferiores a 10 mm de precipitação, correspondendo a 5% da média de chuva do ano. Essas informações mostram a complexidade da estrutura temporal das precipitações.

#### - Dados de chuvas horárias para aplicação no modelo TOPMODEL

Para simulação do modelo, a precipitação na bacia foi calculada pela média das observações das duas estações pluviométricas, D4-116R e D4-118R (Figura 8) no intervalo horário. FAURÈS et al. 1995, observam um impacto importante da variabilidade da precipitação na predição do escoamento. Essa variabilidade foi relacionada com a escala da bacia e a estrutura das chuvas. Os autores verificaram que para pequenas bacias (<1,6 km<sup>2</sup>) a distribuição espacial e temporal da precipitação exerce uma influência significativa no pico de vazão e no escoamento total. Assim, um dos critérios, para a escolha dos eventos simulados, foi considerar os eventos com menor variabilidade da chuva entre as duas estações, procurando garantir uma melhor representação da entrada de água na bacia.

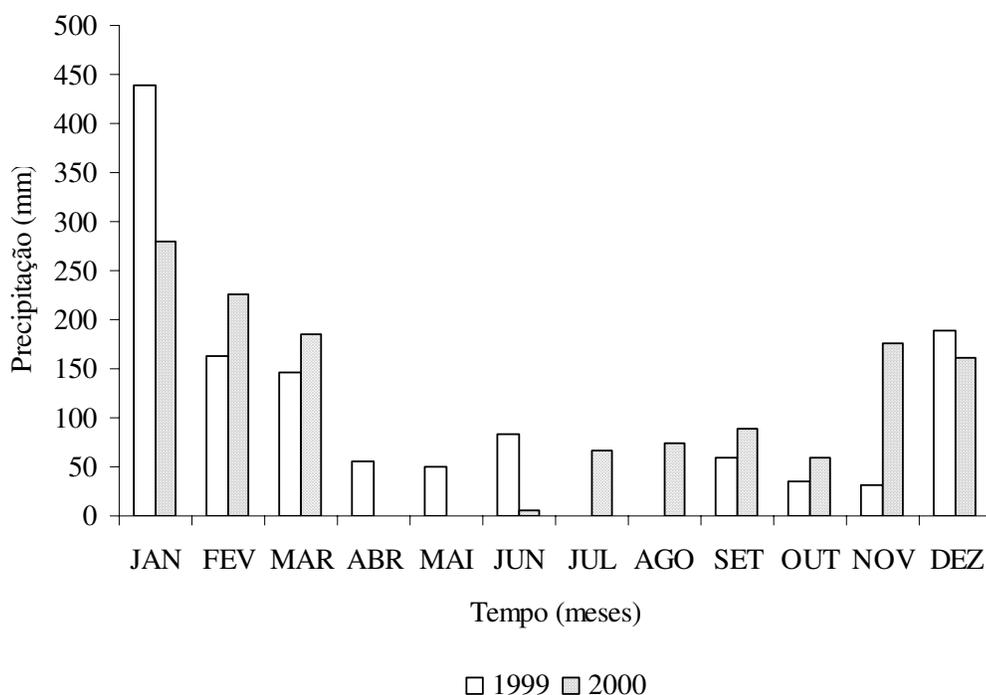


Figura 13 - Distribuição das precipitações médias mensais, correspondentes ao período janeiro a dezembro de 1999 e de 2000 registradas nos pluviógrafos D4-116R e D4-118R, na Bacia do Ribeirão dos Marins seção Monjolinho.

### **5.2.2. Vazão na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho**

#### **- Caracterização das vazões na bacia no período 1999/2000**

A distribuição dos valores diários de vazão máxima, média e mínima ocorridas nos meses na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho, é mostrada na Figura 14. A vazão média anual observada foi  $36 \text{ m}^3/\text{s}$  e  $31 \text{ m}^3/\text{s}$ , respectivamente, em 1999 e 2000 (Figura 14a). As variações das vazões médias mensais no período foram relativamente elevadas. Nos meses de maior precipitação os valores foram superiores a  $4 \text{ m}^3/\text{s}$ . Enquanto, nos meses de menor precipitação as vazões médias mensais não superaram o valor de  $1,2 \text{ m}^3/\text{s}$ . Considerando a variação da vazão média mensal máxima anual (Figura 14b), observa-se uma diferença de  $9,3 \text{ m}^3/\text{s}$ , entre os anos de 1999 e 2000. A vazão diária máxima ocorreu no mês de janeiro para os dois anos analisados,  $25,8 \text{ m}^3/\text{s}$  e  $15,9 \text{ m}^3/\text{s}$ , respectivamente, para os anos de 1999 e 2000 (Figura 14b). A vazão média mensal mínima anual observada foi de  $0,65 \text{ m}^3/\text{s}$  e  $0,23 \text{ m}^3/\text{s}$ , respectivamente para os anos de 1999 e 2000. O maior valor alcançado da vazão diária mínima mensal foi inferior a  $0,20 \text{ m}^3/\text{s}$  em fevereiro de 1999, e para o ano de 2000, os meses de fevereiro, março e abril o valor não atingiu  $0,05 \text{ m}^3/\text{s}$  (Figura 14c).

#### **Dados de vazões horárias para aplicação no modelo TOPMODEL**

Para simulação do modelo, a vazão foi calculada pela distribuição dos valores das leituras registradas no linígrafo da estação 4D-006. Essas leituras eram registradas quando ocorria uma determinada variação na altura da lâmina d'água do escoamento. Inicialmente, a distribuição dos valores de vazão foi realizada, a partir da interpolação entre os dois valores registrados, considerando o intervalo de tempo de quinze minutos. A série das vazões no intervalo de quinze minutos foi à base para calcular a série da vazão no intervalo de tempo horário. Essa série da vazão horária utilizada no processo de simulação do modelo TOPMODEL.

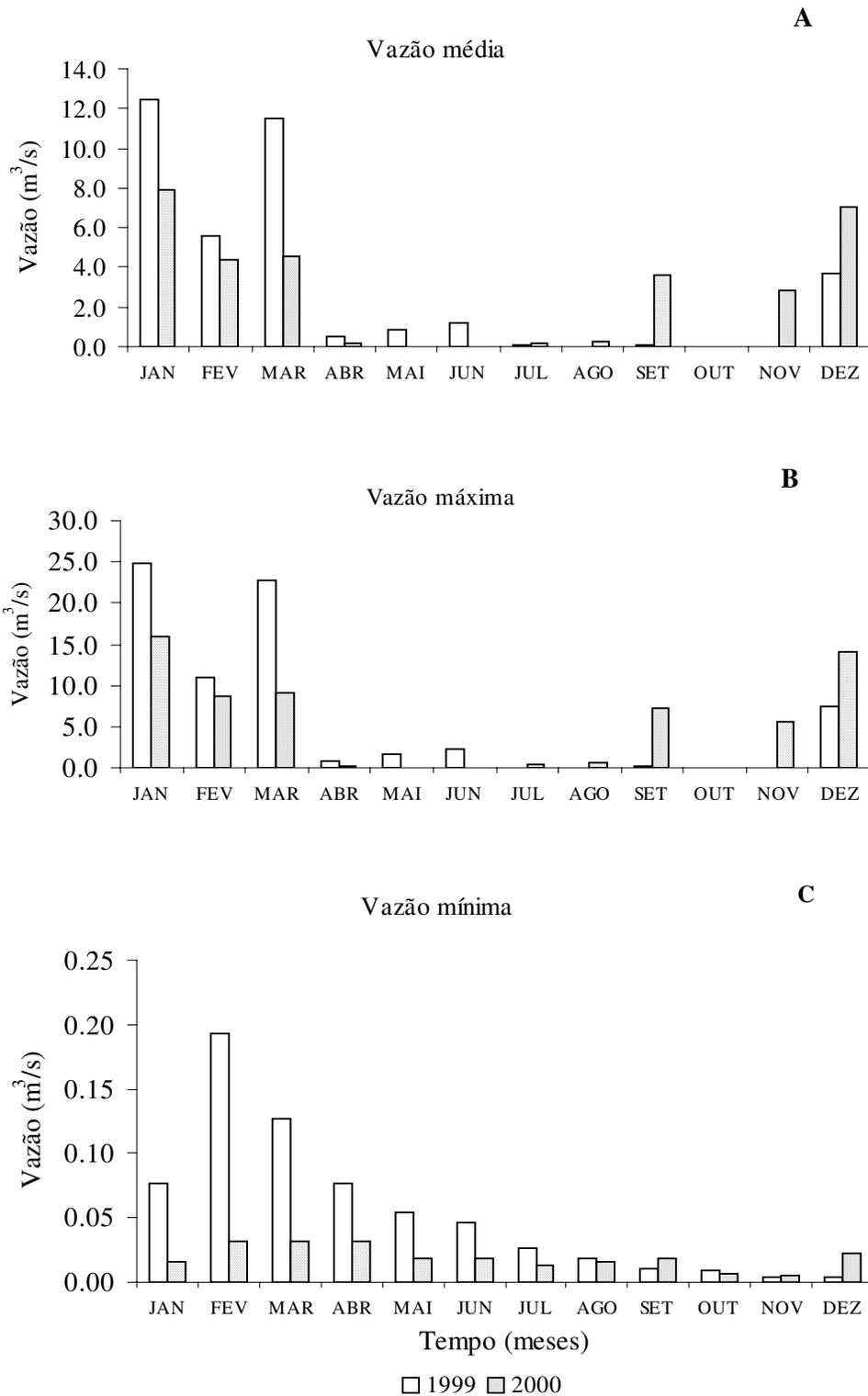


Figura 14 - Distribuição de vazões médias, máximas e mínimas mensais no decorrer do ano de 1999 e de 2000, registradas no linígrafo 4D-006 pertencente ao posto hidrossedimentométrico 4D – 6FM na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho.

### **5.2.3. Evapotranspiração na Bacia do Ribeirão dos Marins seção Monjolinho**

#### **- Caracterização da evapotranspiração na bacia no período 1999/2000**

A figura 16 mostra os valores calculados para a evapotranspiração máxima e mínima na Bacia do Ribeirão dos Marins seção Monjolinho. A quantidade de água evapotranspirada calculada foi de 1056 mm em 1999 e de 1019 mm em 2000. O valor de 114 mm representa a evapotranspiração mensal máxima no ano de 1999, encontrada no mês de dezembro, enquanto que o valor máximo observado no ano de 2000 foi de 110mm, no mês de outubro (Figura 15). Os valores mínimos mensais evapotranspirados ocorreram em junho/1999 e julho/2000, apresentando aproximadamente os valores de 50 mm e 64 mm, respectivamente (Figura 15).

#### **- Dados de evapotranspiração horárias para aplicação no modelo TOPMODEL**

Para simulação dos dados de evapotranspiração no modelo, depois de obter os dados diários pelo modelo de Penman-Monteih, foi calculado os valores horários considerando uma distribuição senoidal dos valores evapotranspirados. A rotina de cálculo detalhada para mudança da escala temporal da evapotranspiração pode ser observada em COELHO (2003) e RANZINI (2002).

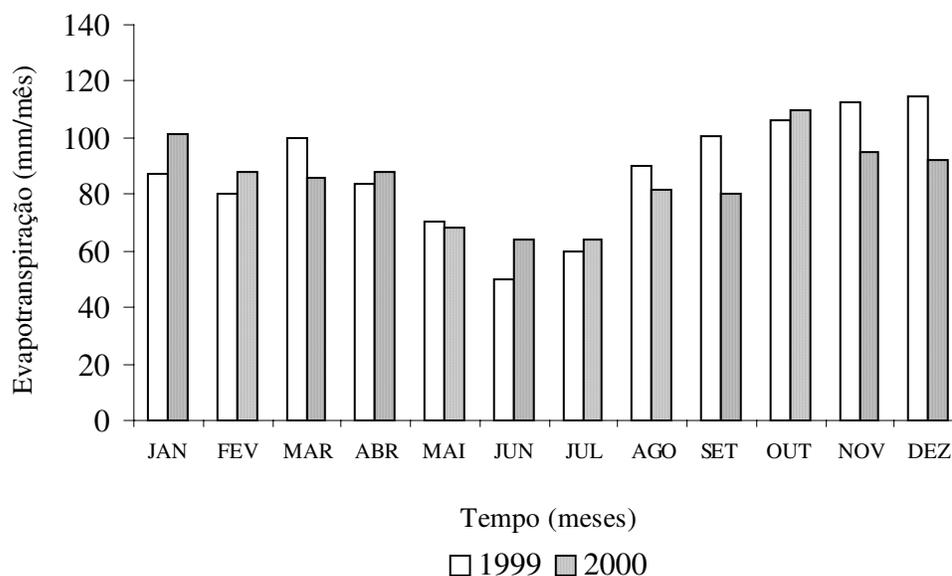


Figura 15 - Distribuição da evapotranspiração mensal estimada pela equação de Penman-Monteith para o ano de 1999 e de 2000, na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho.

### 5.3. Modelagem hidrológica

A utilização de modelos em recursos hídricos é importante na identificação e análise dos processos hidrológicos, que ocorrem na bacia hidrográfica, e podem auxiliar substancialmente na redução dos custos no gerenciamento deste recurso. Assim, é crescente a demanda e o desenvolvimento de modelos para tais finalidades, quer sejam, empíricos ou conceituais, concentrados ou distribuídos.

Atualmente os modelos de simulação hidrológica estão associados aos modelos de informação geográfica. Esses modelos facilitam o gerenciamento do banco de dados e a combinação de informações dentro do espaço geográfico (LOVEJOY et al., 1997). Esse procedimento representa um avanço importante na representação dos dados na escala espacial das bacias hidrográficas.

### **5.3.1 - Simulação do modelo TOPMODEL na Bacia do Ribeirão dos Marins seção Monjolinho**

A utilização de modelos de simulação no balanço hídrico de uma bacia hidrográfica constitui uma importante linha na área do conhecimento da hidrologia, pois a partir da simulação é possível quantificar os fluxos e os armazenamentos de água dos diversos compartimentos do ciclo hidrológico. Os modelos também permitem a simulação das condições atuais e/ou futuras da bacia prevendo os impactos resultantes de possíveis alterações na bacia (uso/ocupação e manejo). Para a simulação das respostas hidrológicas das bacias foram desenvolvidos diversos modelos. Os modelos baseados, principalmente, nos processos físicos tornaram-se mais utilizados por permitirem uma representação mais próxima das condições atuais/futuras da bacia hidrográfica. Dentre estes modelos destaca-se o TOPMODEL, que segundo BEVEN (1997) foi desenvolvido procurando utilizar parâmetros que pudessem ter uma representação espacial e, além disso, uma interpretação física dos processos hidrológicos.

#### **5.3.1.1 - Índice topográfico**

O índice topográfico representa uma importante informação na simulação dos processos de formação dos escoamentos em uma bacia. Uma questão importante que se coloca nesse momento é como os valores dos índices topográficos se comportam com as diversas resoluções de um modelo numérico de terreno. Assim, na Figura 16, procura-se responder essa questão considerando a distribuição do índice topográfico para os diferentes tamanhos de células no MNT da bacia do Ribeirão dos Marins da seção Monjolinho (30 m; 50 m; 70 m; 100 m – Figura 11). Na Figura 16 pode-se observar o efeito do tamanho das células no modelo numérico do terreno na distribuição do índice topográfico. O tamanho de célula de 100x100 m apresentou o maior valor do índice topográfico (15,3) e o menor valor foi para a resolução 30x30 m (13,6). Na resolução de 70x70 m o valor máximo encontrado foi 14,4, o mínimo 5,2 e o valor médio 8,2. Na distribuição dos valores do índice topográfico (Figura 16) observa-se que na medida em que o tamanho da célula aumenta ocorre um deslocamento para a direita, ou seja, na direção dos valores mais altos. Esse resultado concorda com aqueles encontrados por

SAULNIER et al., (1997) mostrando a importância do tamanho das células no modelo numérico do terreno no controle na distribuição do índice topográfico.

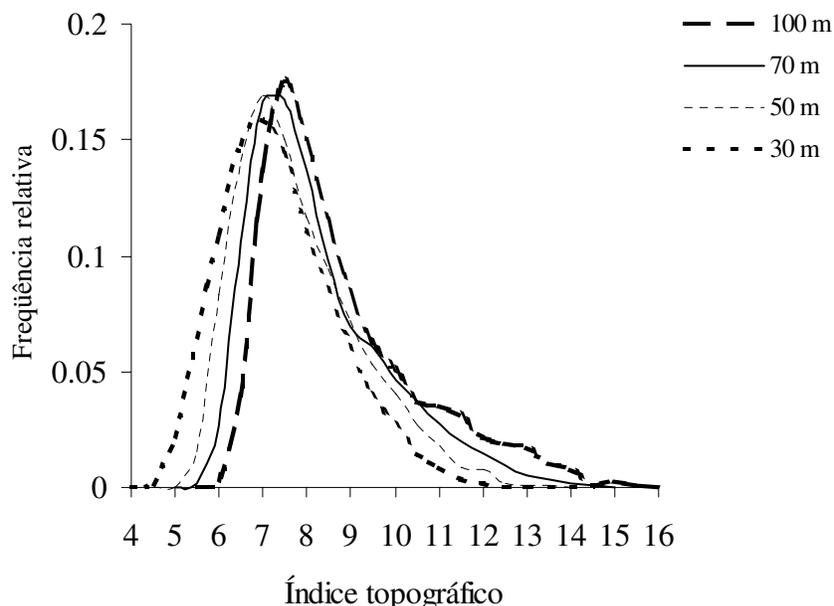


Figura 16 - Distribuição da porcentagem relativa do índice topográfico para malhas de 30, 50, 70, 100 na Bacia do Ribeirão dos Marins seção Monjolinho.

Segundo QUINN et al. (1995) o índice topográfico apresenta uma distribuição diferenciada de acordo com os procedimentos de cálculo e a resolução espacial utilizada. A redução do tamanho de células, até mesmo em bacias moderadamente pequenas, produz um aumento imenso na quantidade de dados de entrada dificultando o processamento do modelo de simulação. Esses autores testaram vários tamanhos de células de 5, 10, 25 e 50 m, em uma pequena bacia de cabeceira pertencente à Bacia River Wye, Plynlimon, na Inglaterra. Eles compararam os tamanhos de células e a representação da realidade da bacia e verificaram que, em resoluções espaciais maiores, os pequenos canais não eram representados. Portanto, deverá ocorrer um ajuste entre a área superficial, o tamanho de célula e a precisão da informação para melhor representar a bacia na simulação. Alguns problemas podem ocorrer quando não há adequação da resolução espacial com a área superficial, tais como, falta de definição da rede de drenagem, menor precisão na determinação da área variável de acumulação e dificuldade na representação de informações pontuais. Entretanto, BRUNEAU et al. 1995 estudando a

variação do tamanho de célula, e o intervalo de tempo na simulação do TOPMODEL, verificaram que, dentro da faixa de resolução entre 5 e 100 m a eficiência do modelo não foi sensivelmente alterada desde que houvesse uma otimização dos parâmetros. Esse estudo mostra que o modelo se ajusta as condições de simulação. Essas condições foram confirmadas por KUO et al. (1999) quando testaram tamanhos de células entre 10 e 100 m, em três bacias adjacentes, com áreas de 647, 2360 e 742 ha, localizadas no noroeste dos Estados Unidos. IORGULESCU e JORDAN (1994) também testaram células de tamanhos diferentes na simulação hidrológica de uma bacia com área de 12,5 km<sup>2</sup>. Essa bacia apresenta 55% dos terrenos ocupados com floresta e o restante da área dividida entre culturas e pastagem. Os tamanhos de célula utilizados foram entre 5 e 25 m na simulação do TOPMODEL. Eles concluíram que a menor resolução produziu uma redução da extensão da distribuição do índice e um decréscimo da precisão na simulação. Entretanto, esta perda de precisão não está relacionada com o tamanho da resolução como os autores sugeriram, e, sim, pode estar relacionada com a precisão da informação de base.

O modelo TOPMODEL efetua as simulações nas classes de mesmo valor de índice topográfico que representariam comportamento hidrológico semelhante. A resposta final do comportamento hidrológico da bacia é calculada pela soma de cada classe, que contribui para o escoamento na bacia. A distribuição da frequência acumulada dos valores de índice topográfico versus a relação entre a área de acumulação da bacia com a área total permite conhecer a porcentagem da área na bacia com probabilidade de saturação. A Figura 17 representa a relação entre a porcentagem de distribuição da área de acumulação da bacia ( $A_c$ ) na área total da bacia ( $A$ ) com a distribuição de frequência acumulada do índice topográfico na bacia do Ribeirão dos Marins seção Monjolinho. No caso, como exemplo, para se ter uma área de saturação de 20% na bacia, o valor de índice topográfico deve ser superior a 9,2. A variação temporal da área de contribuição variável depende da precipitação e do teor de umidade do solo. Assim, para condições mais secas, esta porcentagem será menor e associada um maior valor do índice topográfico.

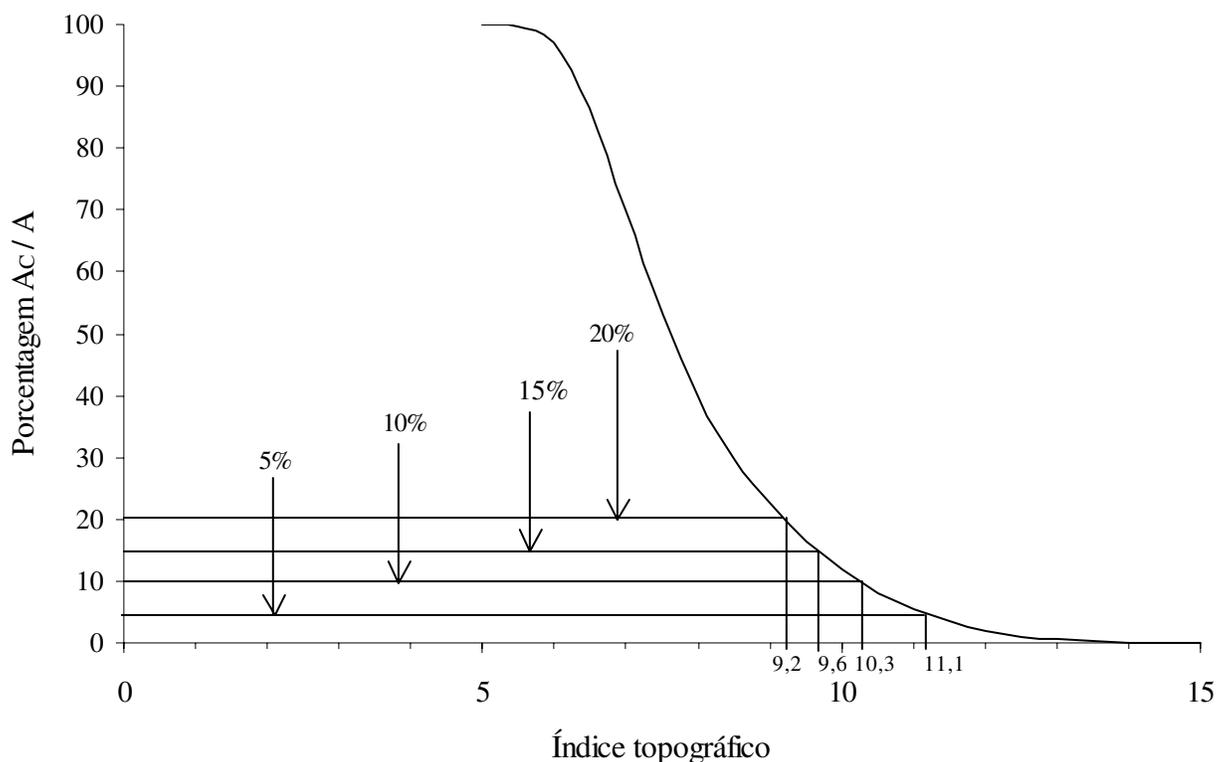


Figura 17 - Porcentagem de distribuição acumulada do índice topográfico, na área da Bacia do Ribeirão dos Marins seção Monjolinho.

BEVEN (1997) alerta que a modelagem do relevo utilizando uma malha pode não representar os caminhos de fluxos numa bacia, pois a escolha da resolução condiciona à qualidade da representação da realidade. Quando a escolha do tamanho das células for superior ao comprimento de rampa das encostas, isto resulta em uma distribuição do índice topográfico que não reflete o caminhamento dos escoamentos, conseqüentemente não terá interpretação física correta. Isto é especialmente importante porque existe uma forte ligação entre o tamanho da célula e o valor dos parâmetros de calibração do modelo.

### 5.3.1.2 - Processo de calibração do modelo TOPMODEL na Bacia do Ribeirão dos Marins seção Monjolinho

No processo de calibração do modelo TOPMODEL foram utilizados como entrada os dados hidrológicos da bacia, áreas de acumulação (índice topográfico) e os parâmetros de

calibração. Para iniciar o processo de calibração foram adotados valores estimados dos parâmetros a partir dos dados da bacia. Estes valores estimados foram ajustados durante o processo de calibração, procurando um melhor ajuste das hidrógrafas entre os valores simulados e observados.

A versão do modelo TOPMODEL utilizada para as simulações das hidrógrafas da bacia foi a TOPWIN (TOPMODEL versão para Windows). Essa versão foi escolhida em função da estrutura computacional, que permite uma visualização dos resultados das simulações diretamente.

#### **5.3.1.2.1 – Escolha da resolução para a bacia**

Para escolha da resolução da escala espacial na simulação do modelo TOMODEL foram levadas em consideração à limitação da estrutura computacional e a qualidade de informação existente na bacia. Assim, a seqüência para escolha da resolução foi a seguinte: 1) determinar o tamanho máximo de malha a ser simulada em função da limitação do modelo; 2) calcular a resolução considerando o tamanho máximo da malha; 3) verificar se a resolução calculada representa as condições das informações existentes e desejáveis para a simulação. Dentre as quatro resoluções espaciais, o tamanho de célula 70m x 70m atendeu as considerações da melhor representação das características da bacia com relação ao processo de simulação do TOPMODEL.

#### **5.3.1.2.2 - Armazenamento exponencial ( $m$ )**

Os valores iniciais do parâmetro  $m$  foram obtidos considerando os eventos escolhidos para o processo de calibração (Tabela 5). Esses valores foram calculados a partir da análise da curva recessão dos hidrogramas. A Figura 18 mostra exemplo do método de obtenção dos valores do parâmetro  $m$ . Os resultados calculados para todos os eventos tiveram como valor mínimo de 0,0004572 m e valor máximo de 0,0050783 m. O valor máximo calculado para a bacia, para iniciar o processo de calibração, foi igual ao valor mínimo da faixa adotado por RANZINI (2002) em área sob cobertura de floresta. O valor de 0,0050783 foi 17% inferior ao valor mínimo do parâmetro  $m$  calculado por COELHO (2003). SCHULER (1998) mostrou

que este parâmetro apresenta valores diferenciados de acordo com o método que foi utilizado para a sua estimativa. A autora utilizou dois métodos para o cálculo deste parâmetro na Bacia do Corumbataí. Os dois métodos empregados foram pela curva de recessão, e a determinação pela condutividade hidráulica. Foram encontrados valores bem menores para o parâmetro  $m$  calculado pela curva de recessão (0,001 a 0,007) em relação aos valores estimados a partir do método da condutividade hidráulica (0,05 a 0,11). Pelas considerações de SAULNIER (1996), um valor elevado do parâmetro  $m$  indica um perfil mais condutor de água, enquanto que valores inferiores estão associados a uma menor condutividade no perfil do solo. Neste caso, quando se faz a comparação com valores estimados pelos autores RANZINI (2002) e COELHO (2003), os solos da Bacia do Ribeirão dos Marins indicaram perfis menos condutores de água.

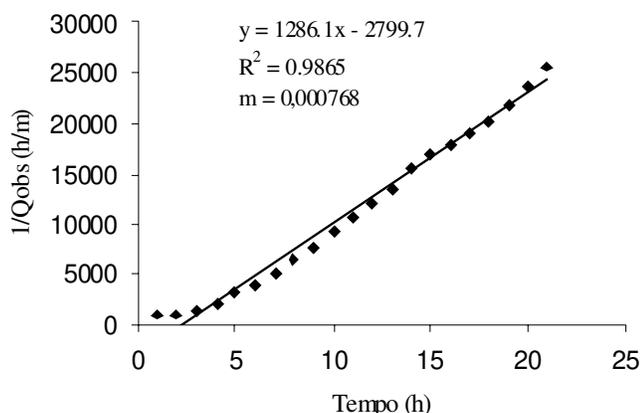


Figura 18 - Exemplo da regressão linear de curva de recessão para cálculo dos valores do parâmetro  $m$ , para utilização no processo de simulação do modelo TOPMODEL na Bacia do Ribeirão dos Marins seção Monjolinho.  $m = 1/[(1/Q_2 - 1/Q_1)/(t_2 - t_1)]$ .

### 5.3.1.2.3 - Transmissividade lateral saturada à superfície do solo ( $T_o$ )

As características do solo constituem um dos aspectos mais importantes na simulação das vazões de uma bacia. No modelo TOPMODEL os solos são considerados homogêneos em toda a bacia e a transmissividade lateral simula as condições gerais da circulação da água nos solos. O valor da transmissividade lateral saturada do solo representa a integral da condutividade hidráulica do solo ao longo do perfil. Esse valor foi estimado a partir do

produto da condutividade hidráulica saturada pelo inverso do valor do parâmetro  $m$ . Os valores calculados para bacia variaram entre 0,057 m<sup>2</sup>/h e 0,077 m<sup>2</sup>/h. Esses valores foram semelhantes aos observados por RENNÓ e SOARES (2003) para argissolos e latossolos sob condições de pastagem e floresta respectivamente, em uma sub-bacia localizada no curso superior do rio Corumbataí pertencente à bacia do Piracicaba-SP. Os valores estimados para as condições da bacia do Ribeirão dos Marins seção Monjolinho apresentaram uma variação baixa comparados com a faixa de valores estimados de 0,005 a 0,08 m<sup>2</sup>/h obtidos por SCHULER et al. (2000) e RENNÓ e SOARES (2003). MINE e CLARK (1996) estimaram os valores de 0,010 a 0,100 m<sup>2</sup>/h na Bacia do Rio Belém em Prado Velho. RANZINI (2002) calculou os valores de 0,030 a 0,100 m<sup>2</sup>/h na bacia D localizada no Parque Estadual da Serra do Mar – Núcleo de Cunha. Essas variações evidenciam o comportamento diferencial dos solos quanto à condutividade hidráulica do perfil do solo.

Com base nos resultados pode-se concluir que a condutividade hidráulica dos solos na bacia do Ribeirão dos Marins seção Monjolinho, comparados às de outras áreas, principalmente sob cobertura de floresta, mostraram uma variabilidade menor. SAULNIER (1996) alerta que normalmente se considera a condutividade vertical idêntica à condutividade horizontal (lateral), ou seja, se admite a isotropia dos solos. Entretanto, existem diferenças importantes entre essas condutividades, normalmente, a condutividade horizontal é mais elevada que a vertical. SAULNIER (1996) cita dados mostrando a condutividade lateral em certos casos chega a ser até 100 vezes maior que a vertical. FRANCHINI et al. (1996) e SCHULER et al. (2000) observaram, que durante o processo de calibração do modelo TOPMODEL o parâmetro transmissividade ( $T_o$ ) era influenciado pela resolução espacial, assim, podendo perder o significado físico e atingir valores freqüentemente superiores aos obtidos em campo.

#### **5.3.1.2.4 - Capacidade máxima de água disponível na zona das raízes ( $SR_{max}$ )**

A capacidade de armazenamento das raízes está relacionada às características dos solos, tipo e o estado de desenvolvimento da cultura. Segundo os autores MOLICOVÁ et al. (1997) e SAULNIER (1996), a capacidade de água disponível na zona das raízes ( $SR_{max}$ ) condiciona os processos de evapotranspiração e de percolação. A capacidade máxima de água

disponível na zona das raízes ( $SR_{max}$ ) foi estimada a partir do produto da quantidade de água disponível ( $\theta_{cc} - \theta_{pp}$ ) pela profundidade do perfil. A profundidade do perfil na bacia do ribeirão dos Marins seção Monjolinho foi considerada igual a um metro. Os valores estimados de  $SR_{max}$  para os diversos solos da bacia variaram de 0,058 m a 0,123 m. Esses valores foram próximos aos encontrados por SCHULER et al. (2000) e intermediários aos estimados por RANZINI (2002) na bacia D localizada no Parque Estadual da Serra do Mar – Núcleo de Cunha.

#### **5.3.1.2.5 - Déficit inicial de umidade na zona das raízes ( $SR_o$ )**

Para início da simulação, os valores estimados para o déficit inicial de umidade na zona das raízes foram considerados 40% dos valores calculados para  $SR_{max}$  (0,02 a 0,05 m). Esse procedimento foi adotado levando-se em conta que esse parâmetro depende somente dos eventos anteriores. Assim, inicialmente considerou-se que as condições de umidade dos solos fossem intermediárias. VARELLA e CAMPANA (2000) consideraram um único valor de  $SR_o$  para simulação de todos os eventos numa área de 114 km<sup>2</sup>. RANZINI (2002) estimou os valores entre 0,010 e 0,030 m.

#### **5.3.1.2.6 - Velocidade de propagação no canal ( $CHV$ )**

A velocidade de propagação no canal obtida na Bacia do Ribeirão dos Marins seção Monjolinho (Apêndice A) foi estimada entre 2170 m/h a 3320 m/h. SANTOS (2001) considerou, para a velocidade de propagação, valores entre 450 e 500 m/h. Esses valores são inferiores aos obtidos para bacia. Outros autores calcularam valores superiores como: MINE e CLARKE (1996) estimaram um valor de 3960 m/h, RANZINI (2002) adotou 5200 m/h e SCHULER et al. (2000) obteve 7200 m/h. Os valores dependem das condições físicas do canal (leito, margem e declividade) e das condições que determinam a formação e distribuição dos volumes do escoamento (estrutura da precipitação e umidade do solo).

### 5.3.1.2.7 - Simulação na calibração

Os parâmetros estimados foram aplicados para a simulação dos eventos selecionados para o processo de calibração no modelo. Doze eventos foram separados para o calibrar os parâmetros do modelo. A Tabela 5 mostra os valores dos parâmetros que caracterizaram os eventos no processo de calibração. Inicialmente estes eventos foram divididos em três grupos de acordo com as características das precipitações médias na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho (Tabela 5). Nessa divisão os intervalos de valores da precipitação considerados foram: grupo 1 - eventos com precipitações acima de 50 mm; grupo 2 – eventos com precipitações entre 20 a 50 mm e grupo 3 - eventos com precipitações menores de 20 mm (Tabela 5).

Tabela 5- Valores da precipitação total, vazão e volumes observados para cada um dos períodos utilizados e agrupamento dos eventos em função da precipitação no processo de calibração do Modelo TOPMODEL na Bacia do Ribeirão dos Marins seção Monjolinho – Piracicaba–SP.

Evento	Período	Intervalo de base do hidrograma (h)	Precipitação total (mm)	Vazão máxima observada (m <sup>3</sup> /s)	Volume escoado observado (m <sup>3</sup> )	Coefficiente de escoamento (%)	Grupo dos eventos
01	03 a 05/01/99	41	29,5	23,4	763484	19,5	2
02	11 a 12/01/99	33	7,4	10,5	276224	31,4	3
03	13 a 14/01/99	33	33,4	5,3	133742	41,7	2
04	14 a 16/01/99	35	83,9	15,0	383482	41,3	1
05	02 a 04/02/99	51	23,2	6,9	141032	55,3	2
06	11 a 12/02/99	31	22,9	5,7	127015	54,8	2
07	01 a 02/03/99	47	17,1	15,1	306833	35,5	3
08	20 a 24/06/99	114	44,2	9,1	282657	14,2	2
09	07 a 09/01/00	40	58,3	8,6	517168	29,9	1
10	12 a 19/02/00	167	65,5	15,0	33665	35,8	1
11	23 a 24/02/00	32	10,7	1,5	51187	14,3	3
12	14 a 16/09/00	51	30,9	2,2	138595	20,7	2

Na Tabela 5 verifica-se que a vazão máxima observada ocorreu no evento 01, cujo valor da chuva era de 29,5 mm. No evento 12, com valor de chuva próximo ao evento 01, ocorreu uma das menores vazões observadas entre os eventos.

Pelos resultados mostrados na Tabela 5, pode-se observar que nos eventos 05 e 06 mais 50% da chuva ocorrida foi convertida em escoamento. O menor coeficiente de

escoamento foi verificado no evento 08. Neste evento apenas 14% dos 44 mm de chuva foram transformados em escoamento. Foi observado que eventos com volumes precipitados bem diferentes apresentaram coeficientes de escoamento semelhantes. Tal fato ocorreu nos eventos 03 com o 04, o evento 07 com o evento 10, e o evento 08 e 11. Pelos resultados apresentados no coeficiente de escoamento, destes eventos, verifica-se que não existe uma relação linear entre o volume precipitado e o volume escoamento.

Os hidrogramas resultantes da calibração dos eventos pertencentes ao grupo 1 estão apresentados nas Figuras 19 a 21 (Figura B1 a B3 – apêndice B). O grupo 2 é mostrado nas Figuras 22 a 27 (Figura B4 a B9 – apêndice B), e o grupo 3 nas Figuras 28 a 30 (Figura B10 a B12 – apêndice B). Esses eventos em uma escala ampliada podem ser visualizados no Apêndice B.

As hidrógrafas observada e simulada do evento 04 são mostradas nas Figuras 19 e B1 – Apêndice B. Nessas figuras pode verificar que os dois picos de vazão simulados apresentaram um comportamento diferenciado com relação à vazão e o volume. No primeiro pico a vazão simulada máxima foi 8% ( $2 \text{ m}^3/\text{s}$ ) acima da vazão máxima observada e o volume simulado foi 17% superior ao observado. As curvas de recessão apresentaram formas semelhantes no primeiro pico de vazão simulado. Quanto ao tempo de pico das vazões máximas eles foram próximos, instante 10 e 11 horas para observada e simulada, respectivamente. Com relação ao segundo pico o resultado da vazão simulada foi bem diferente do observado. Nesse pico ocorreu uma superestimação da vazão de  $4,9 \text{ m}^3/\text{s}$  observada para  $13,7 \text{ m}^3/\text{s}$  simulada. A resposta do modelo para o segundo evento de chuva não foi adequada, tanto para os valores do hidrograma simulados como sua posição no tempo. Essas condições poderiam indicar alguma falta de qualidade dos dados observados.

A hidrógrafa simulada no evento 09 apresentada nas Figuras 20 e B2 – Apêndice B. Esse evento mostra a vazão máxima simulada 6% superior em relação ao observada. A diferença entre os volumes foi menor que 1%. O tempo de pico da vazão máxima foi defasado de 3 horas. Neste evento foi verificado um atraso na simulação do tempo de início do escoamento superficial.

Quanto ao evento 10, mostrado nas Figuras 21 e B3 – Apêndice B, foi observado que houve coincidência no tempo de pico da vazão máxima. A vazão máxima simulada foi

superestimada em 22% e o volume simulado apresentou um valor de 12% abaixo do volume observado com o tempo de início do escoamento superficial retardado em quase 10 horas.

As simulações dos eventos do Grupo 1 mostraram um ajuste melhor na simulação da vazão máxima, apresentando diferenças entre as vazões observadas e simuladas menores que 10%, tendo como exceção o evento 10. Os volumes simulados foram menores em relação ao observado. Um fato comum, nas simulações dos eventos, foi o retardamento do instante do início do escoamento simulado.

As figuras 22 e B4 – Apêndice B mostram a simulação do evento 01. Nessa simulação ocorreu uma coincidência do instante do início do escoamento e o comportamento semelhante da curva de recessão. A vazão máxima simulada foi subestimada em 28% e defasada, adiantado em duas horas em relação aos volumes simulados, que foram superestimados em 42%.

No evento 03, mostrado nas Figuras 23 e B5 – Apêndice B, observa-se que diferença entre os volumes foi de 2% menor para o volume simulado. Porém, a vazão simulada foi subestimada em 23% ocorrendo um pequeno adiantamento de 1 hora na simulação da vazão máxima.

A simulação do evento 05 é apresentada nas Figuras 24 e B6 – Apêndice B. Nesse evento o modelo apresentou um bom ajuste quanto à simulação das vazões e do volume. A diferença entre a vazão máxima observada e simulada foi de 4%.

No evento 06 (Figuras 25 e B7 – Apêndice B) foi observada uma vazão máxima simulada subestimada em 6% e, esse mesmo valor, verificado para o volume simulado. O tempo de pico, em que a vazão máxima simulada ocorreu, foi adiantado em 2 horas. Nesse evento foi verificado um adiantamento de 2 horas no instante de início do escoamento superficial.

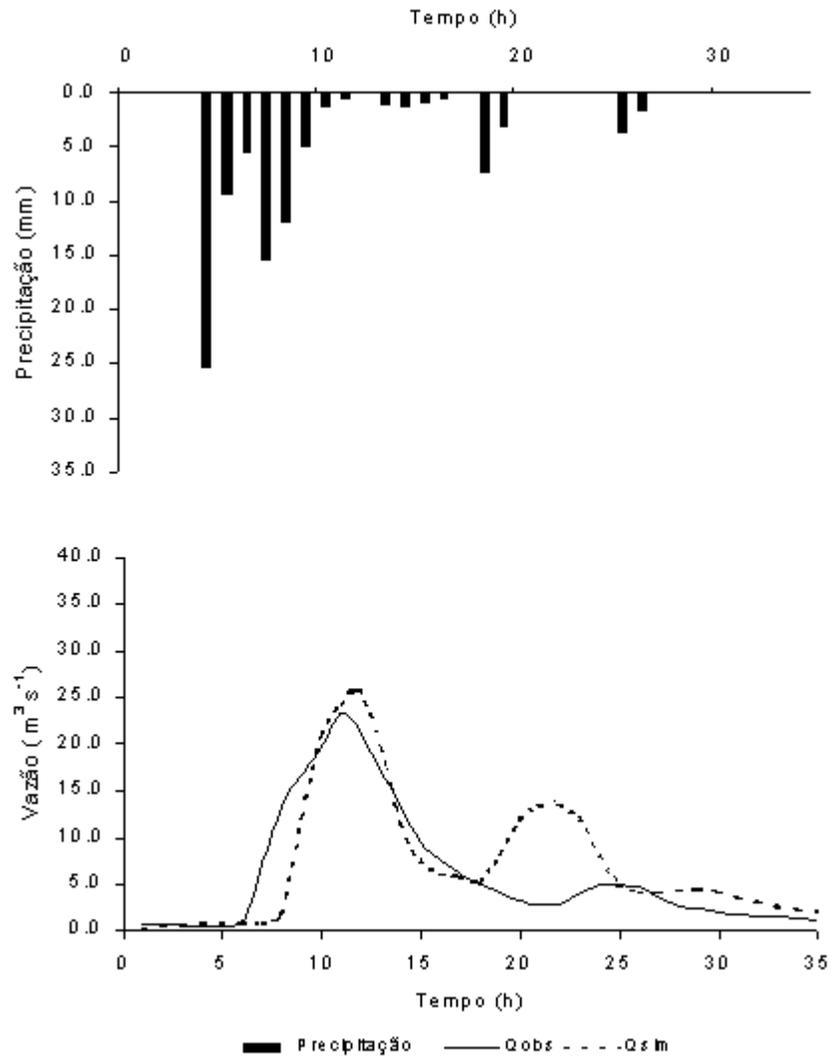


Figura 19 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de calibração utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 04 no período de 14 a 16/01/99 – 35 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho– Piracicaba – SP.

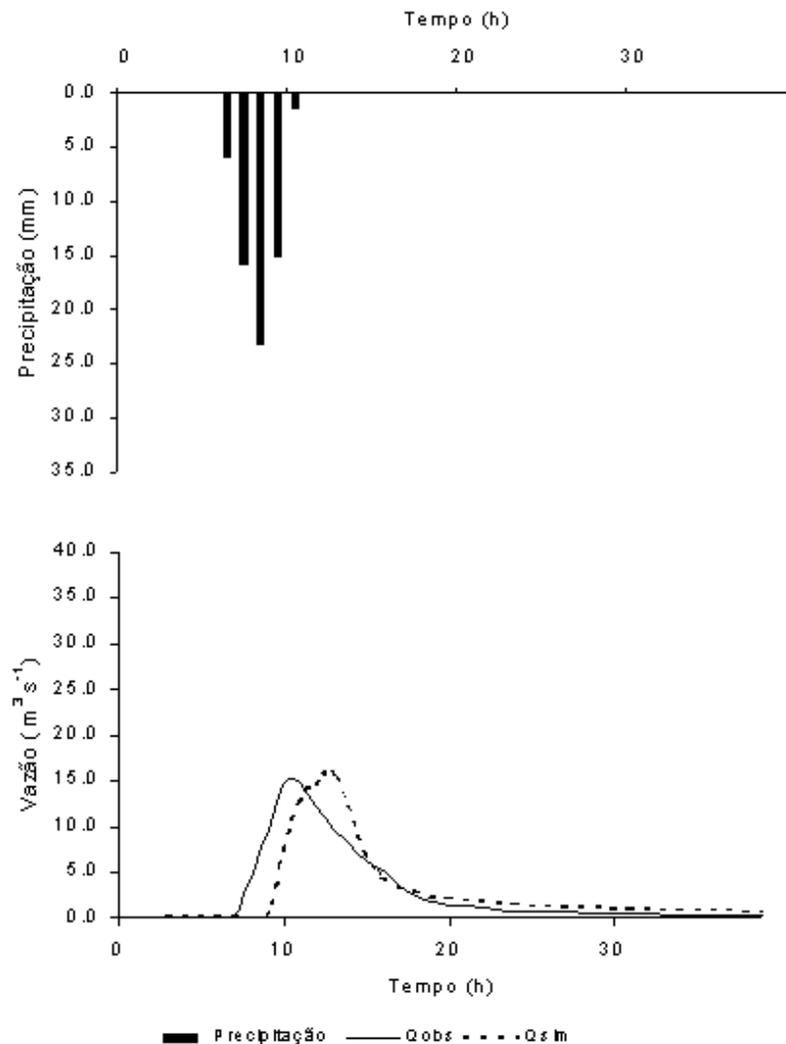


Figura 20 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de calibração utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 09 no período de 07 a 09/01/00 – 40 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006, monitorado pelo CTH/DAEE, bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP.

No evento 08, mostrado nas Figuras 26 e B8 – Apêndice B, verificou-se que o tempo de início e a ascensão do escoamento superficial simulado apresentaram coincidentes ao observado. Na curva de recessão simulada observou-se uma diminuição mais lenta. Nesse evento ocorreu uma subestimação da vazão máxima em torno de 23%.

O evento 12 (Figuras 27 e B9 – Apêndice B) apresentou uma subestimação da vazão máxima simulada em 25%, ocorrendo duas horas após o pico da vazão máxima observada.

Pode-se observar no grupo 2, que nos eventos 05 e 08 ocorreu um bom ajuste entre as hidrógrafas observadas e simuladas. O evento 06 apresentou a menor variação entre o volume observado e o simulado, mas quanto à forma da hidrógrafa o resultado foi inferior. O evento 12 apresentou um menor desempenho em relação aos outros eventos. Esse grupo mostrou um adiantamento no instante de início do escoamento superficial para três eventos (03, 06 e 12). Os eventos 03, 06 e 12 apresentaram valores do parâmetro  $SR_o$  calibrados de 39 mm, 10 mm e 20 mm, respectivamente. Esse comportamento mostrou-se diferente quando comparado com o grupo 1, no qual se observou um atraso do escoamento superficial em eventos cujos valores de  $SR_o$  calibrados foram de 38 mm e 45 mm (eventos 09 e 10 respectivamente). A defasagem no início do escoamento superficial pode estar ligada aos valores do parâmetro calibrado  $SR_o$ , pois para valores menores ocorreram atrasos e para valores maiores, adiantamentos.

A simulação do evento 02, pertencente ao Grupo 3, é mostrada nas Figuras 28 e B10 – Apêndice B. A simulação, nessas figuras, mostra a não adequação dos valores simulados e observados, da forma e dos instantes de início de escoamento.

Para o caso do evento 07 representado nas Figuras 29 e B11 – Apêndice B, mostra-se que a vazão máxima simulada foi subestimada em 39%, o volume 48% foi superestimado e o tempo de pico foi defasado (atrasado) em uma hora.

As Figuras 30 e B12 – Apêndice B, correspondem à simulação do evento 11. Nessa figura observa-se que os instantes de início são coincidentes. A ascensão e a recessão dos hidrogramas observado e simulado apresentam-se muito diferentes. Esse evento mostrou um desempenho semelhante ao obtido na simulação do evento 2. A curva de recessão desses dois eventos apresenta diminuição lenta dos valores simulados produzindo valores de vazão simulada acima dos valores observados.

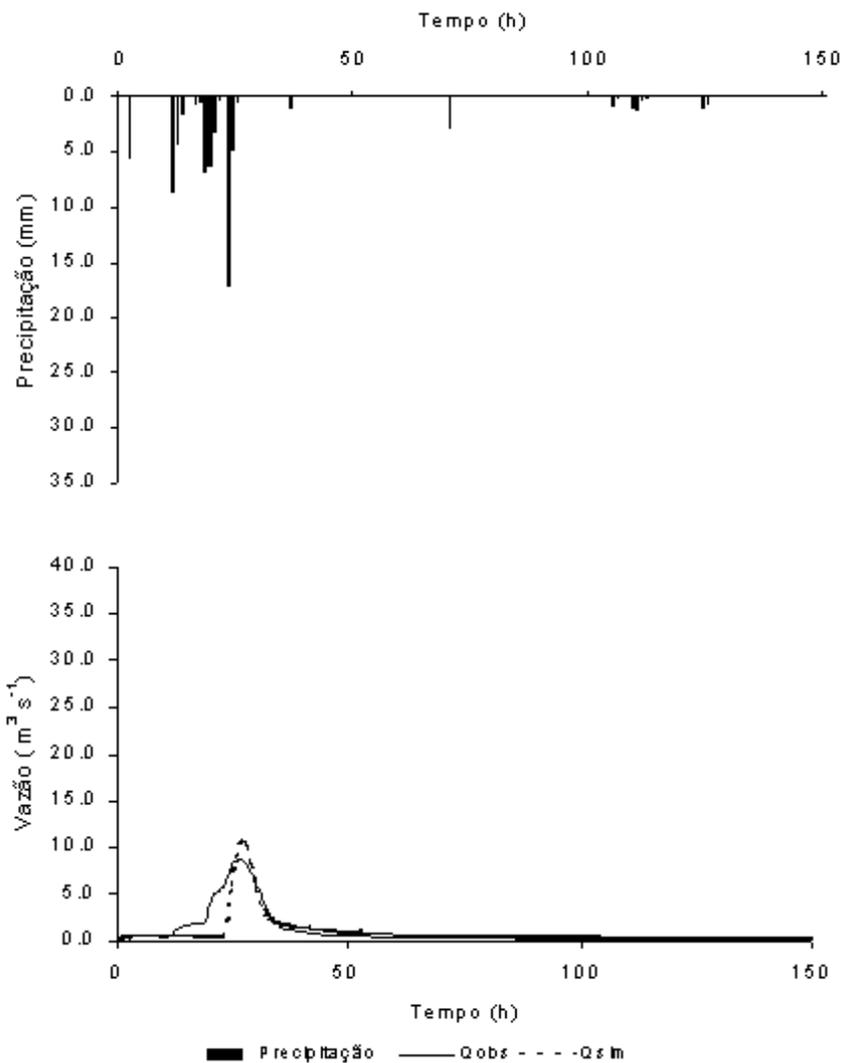


Figura 21 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de calibração utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 10 no período de 12 a 19/02/00 – 167 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE, bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP.

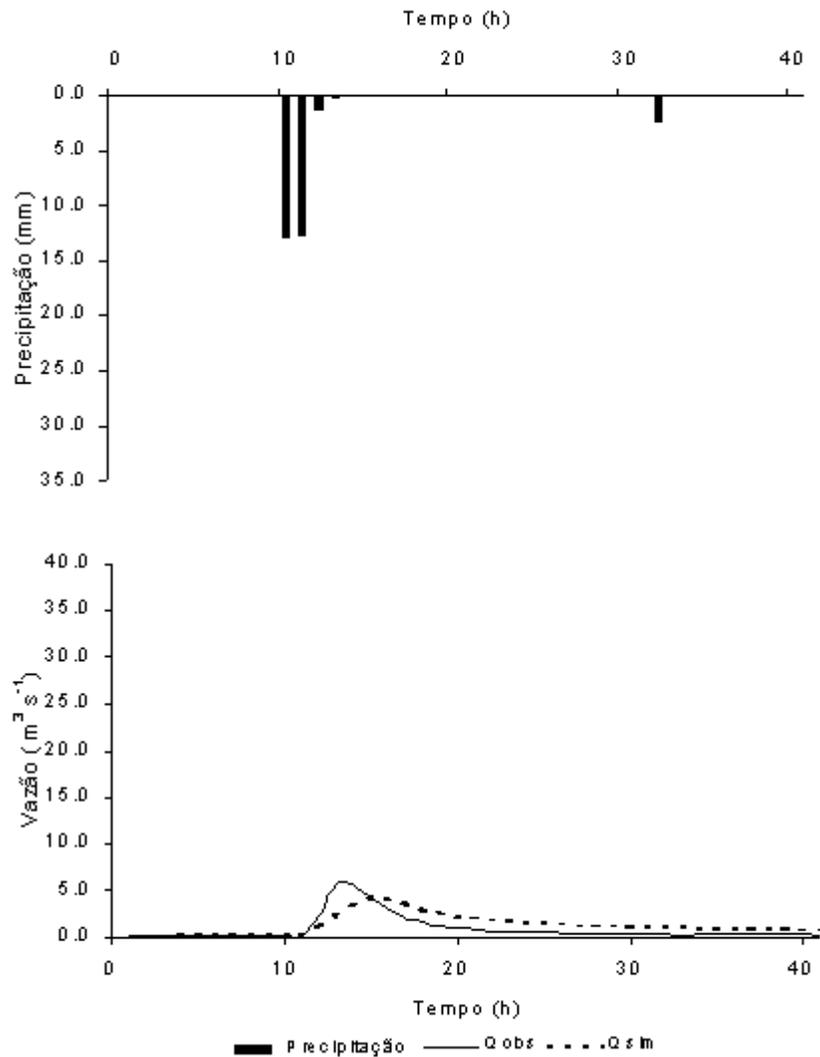


Figura 22 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de calibração utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 01 no período de 03 a 05/01/99 – 41 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE, bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP.

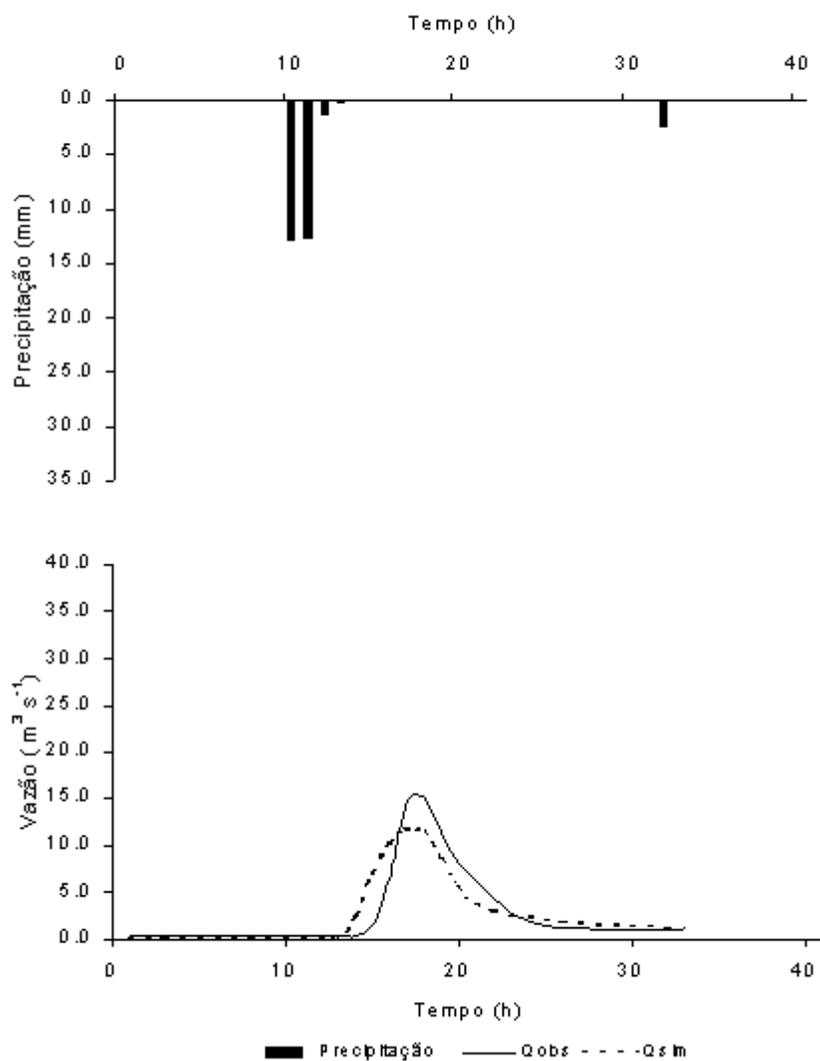


Figura 23 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de calibração utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 03 no período de 13 a 14/01/99 – 35 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE, bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP.

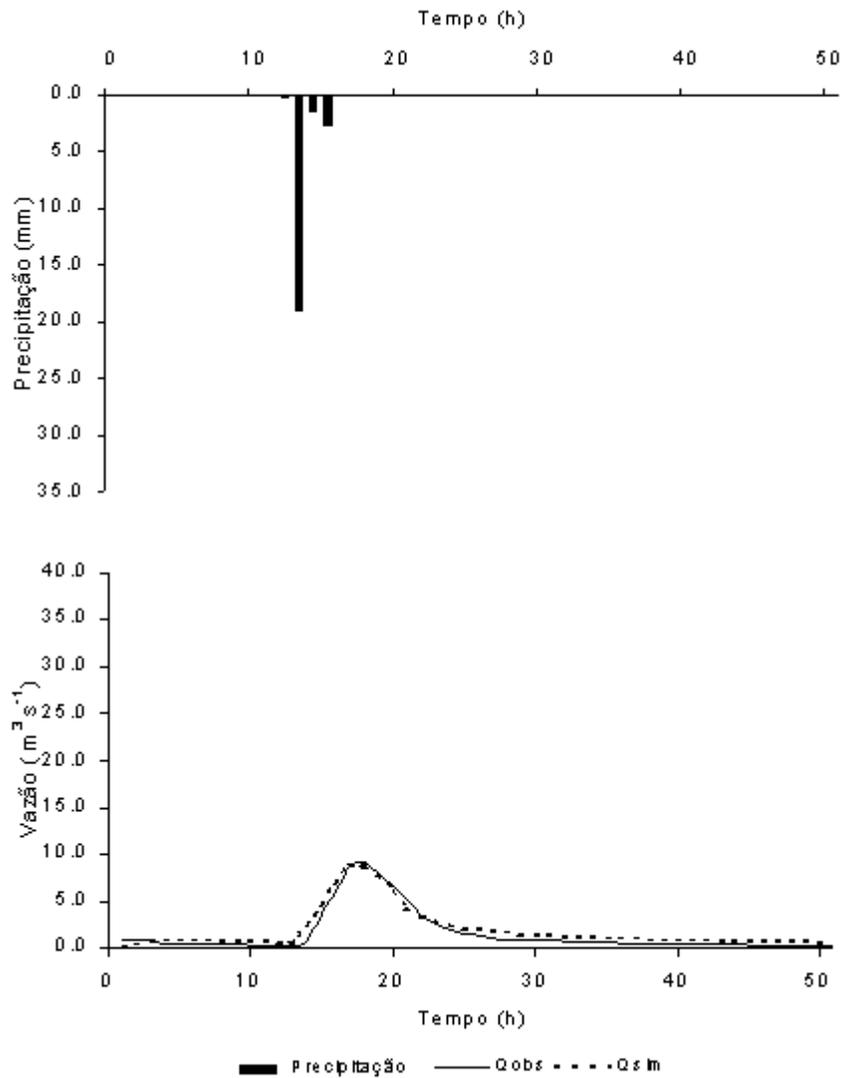


Figura 24 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de calibração utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 05 no período de 02 a 04/02/99 – 51 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE, bacia do Ribeirão Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP.

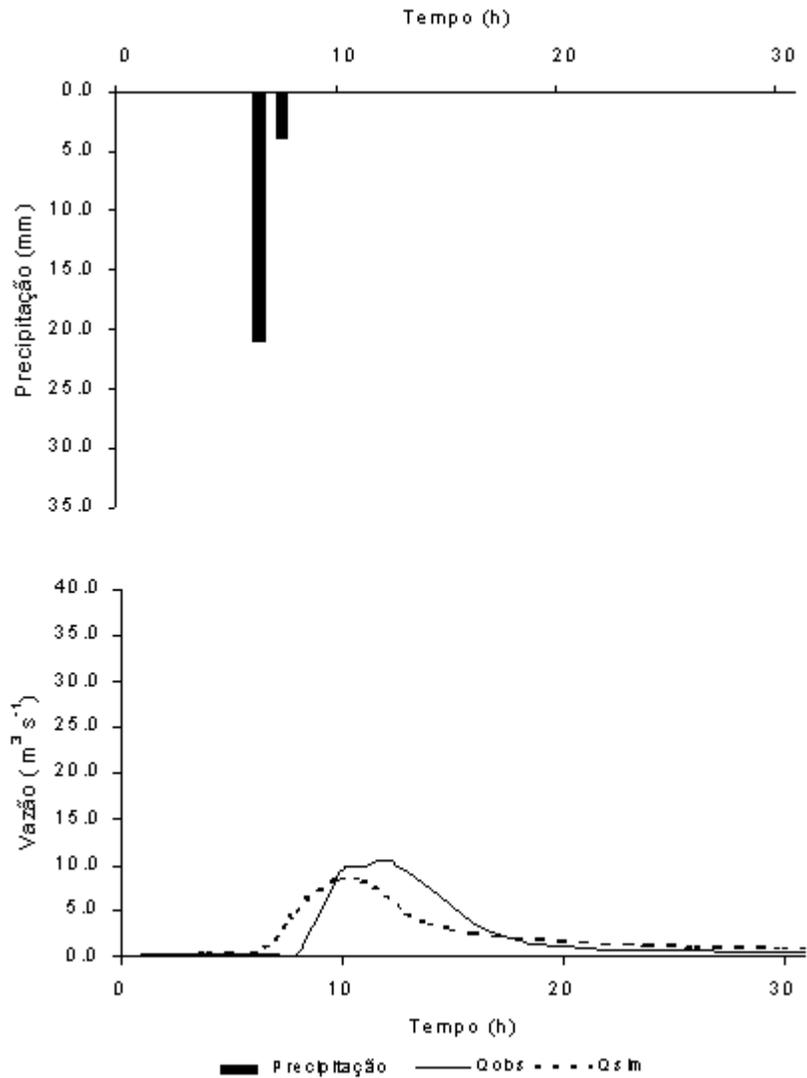


Figura 25 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de calibração utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 06 no período de 11 a 12/02/99 – 31 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE, bacia do Ribeirão Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP.

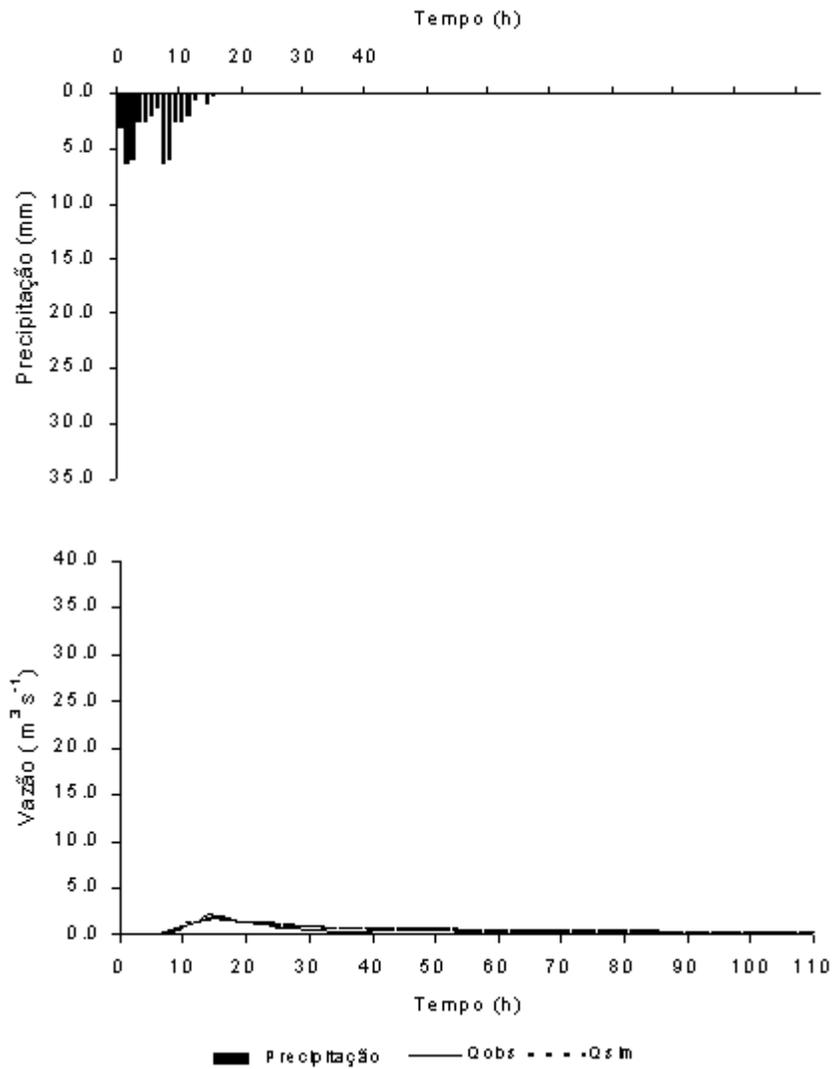


Figura 26 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de calibração utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 08 no período de 20 a 24/06/99 – 114 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE, bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP.

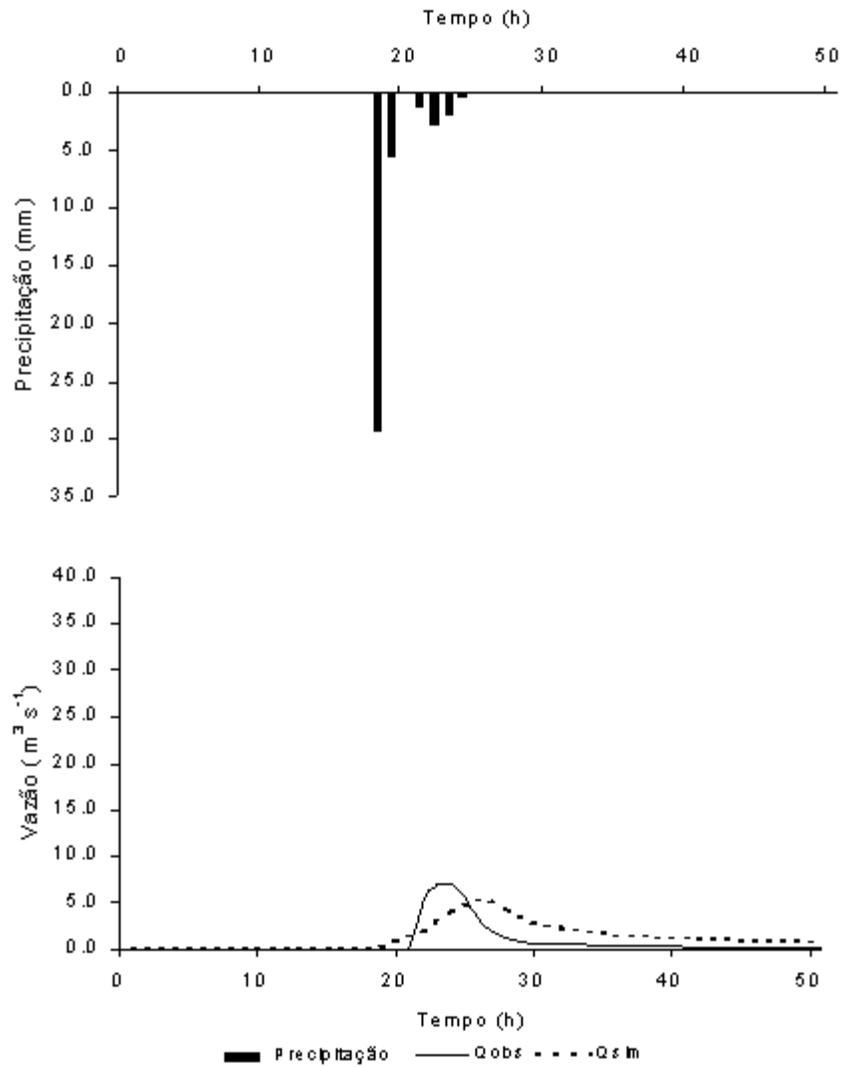


Figura 27 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de calibração utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 12 no período de 14 a 16/09/00 – 51 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na seção Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP.

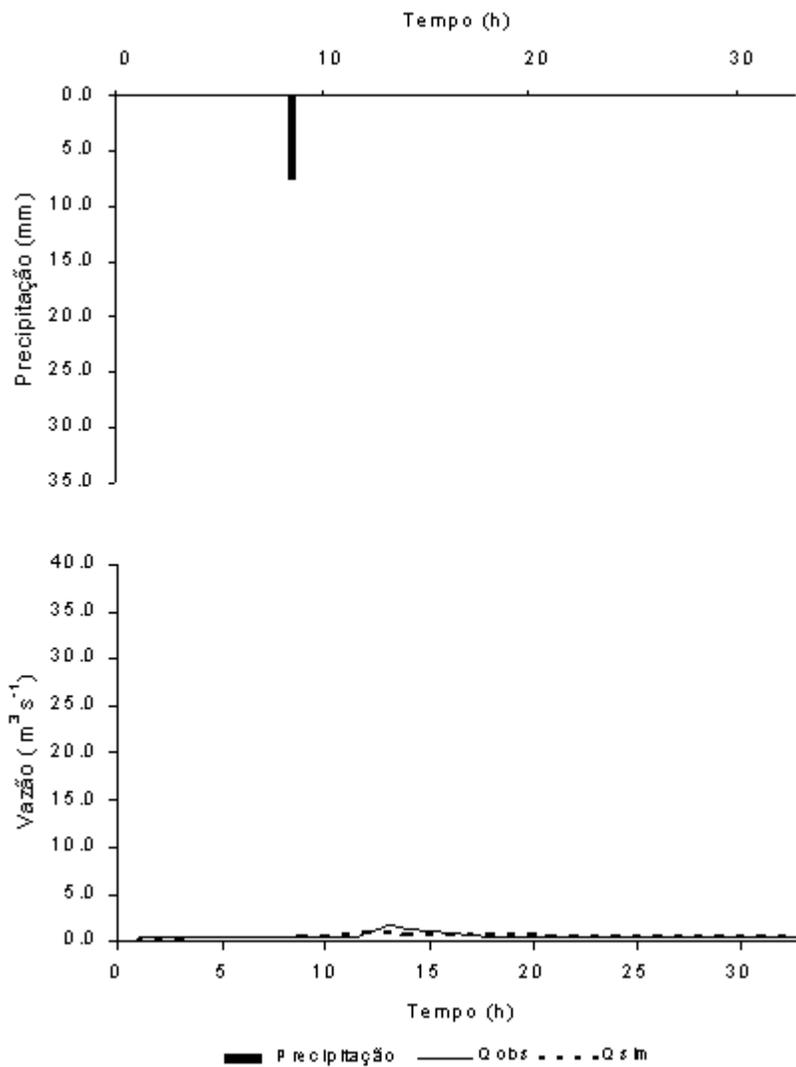


Figura 28 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de calibração utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 02 no período de 11 a 12/01/99 – 33 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP.

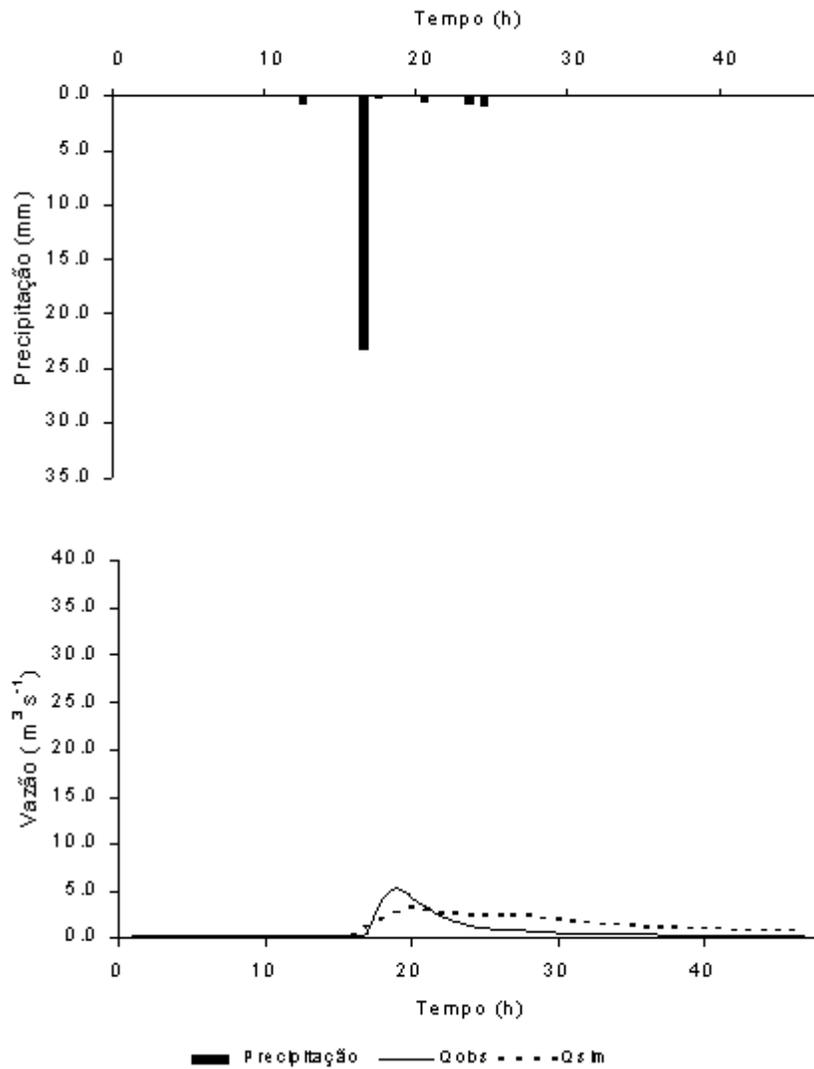


Figura 29 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de calibração utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 07 no período de 01 a 02/03/99 – 47 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP.

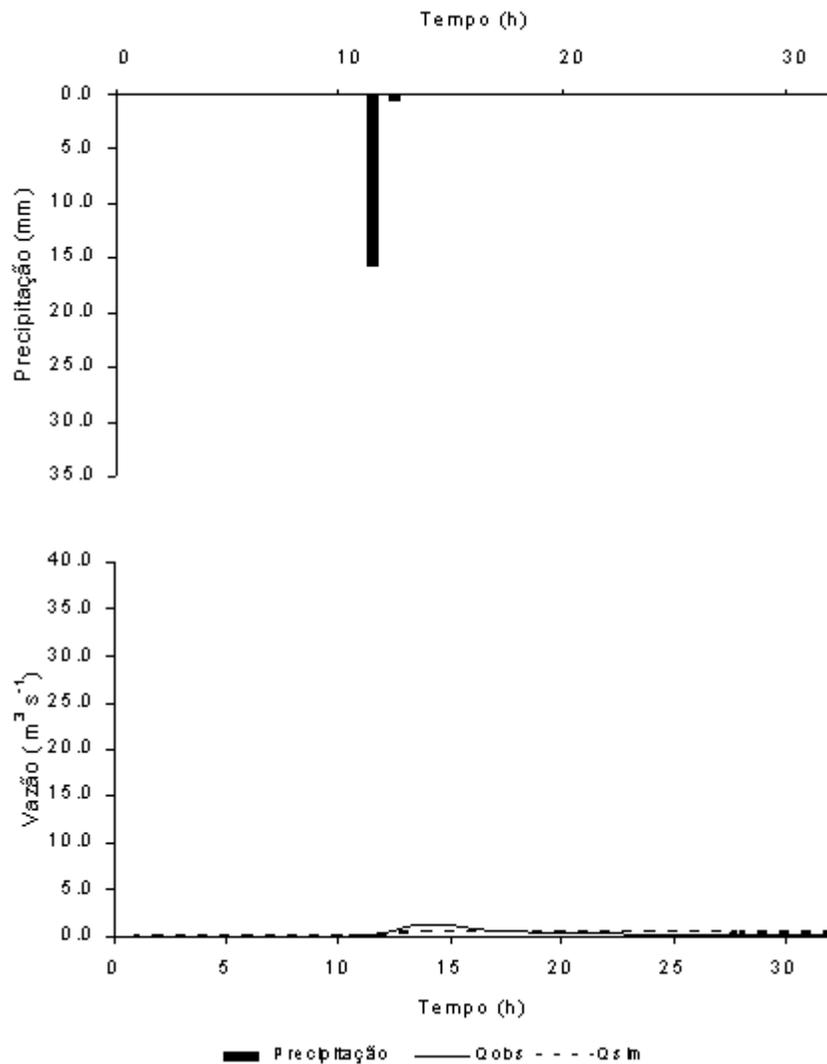


Figura 30 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de calibração utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 11 no período de 23 a 24/02/00 – 32 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP.

Os eventos do grupo 3 apresentaram um resultado final semelhante ao da simulação. Os eventos 02 e 11 registraram hidrógrafas simuladas com comportamentos diferentes das observadas. A razão para esta discordância com os dados observados pode ser a inadequação do conjunto dos parâmetros usados para as condições hidrológicas do grupo 3. O evento 07

apresentou um comportamento melhor da simulação comparada aos eventos 02 e 11. Entretanto, a ordem de grandeza dos valores de vazão observada do evento 07 é significativamente superior aos eventos 02 e 11. O resultados da calibração dos eventos do grupo 3 estão em acordo com os relatos de RANZINI (2002), que mostrou a dificuldade do modelo em simular eventos com precipitação inferior a 20 mm.

O conjunto de valores dos parâmetros calibrados nos eventos para a bacia do Ribeirão dos Marins seção Monjolinho, Piracicaba-SP, é mostrado na Tabela 6 e 7.

Tabela 6- Parâmetros do processo de calibração do modelo TOPMODEL na bacia do Ribeirão dos Marins seção Monjolinho

Parâmetros do modelo TOPMODEL	Valor	Unidade
Armazenamento exponencial ( $m$ )	0,00315	m
Transmissividade lateral saturada ( $T_o$ )	2,00860	$m^2 \cdot h^{-1}$
Velocidade de propagação no canal ( $CHV$ )	2000	$m \cdot h^{-1}$
Capacidade máxima de armazenamento na zona das raízes ( $SR_{max}$ )	107,90	mm

Tabela 7- Valores do déficit inicial ajustados de umidade na zona das raízes ( $SR_o$ ) e a eficiência de Nash e Sucliffe ( $E$ )<sup>(1)</sup> para os eventos utilizados no processo de calibração

Evento	Período	$SR_o$ (mm)	$E^{(1)}$
1	03 a 05/01/99	10,79	0,485
2	11 a 12/01/99	0,96	0,383
3	13 a 14/01/99	39,51	0,834
4	14 a 16/01/99	47,51	0,558
5	02 a 04/02/99	7,11	0,956
6	11 a 12/02/99	10,31	0,717
7	01 a 02/03/99	12,30	0,364
8	20 a 24/06/99	14,15	0,826
9	07 a 09/01/00	37,78	0,651
10	12 a 19/02/00	44,55	0,707
11	23 a 24/02/00	6,06	0,284
12	14 a 16/09/00	20,81	0,313

$$^{(1)} E = 1 - \frac{\text{Soma dos quadrados dos erros}}{(\text{Variância da vazão observada})^2}$$

Os doze eventos analisados no processo de calibração apresentaram comportamento variado em resposta as precipitações médias de entrada, que variaram entre 7 mm e 74 mm. Importante verificar que o desempenho melhor na simulação do modelo foi para o eventos do grupo 2, pertencente a classe de precipitações entre 20 e 50 mm. O grupo 3, com menor valor de chuva de entrada, apresentou resultados inferiores aos outros dois grupos.

A vazão máxima simulada do evento 04 (Figura 19 – B1 Apêndice B) foi da ordem de 25 m<sup>3</sup>/s. Neste evento a precipitação foi de aproximadamente 74 mm, o coeficiente de escoamento em torno de 40%, mas sua eficiência de simulação foi de 0,56. Os eventos cujas vazões observadas foram inferiores a 2 m<sup>3</sup>/s apresentaram eficiência menor na simulação, exceção ao evento 08 (Figura 26 – B8 Apêndice B), em que a vazão observada foi da ordem de 2 m<sup>3</sup>/s, entretanto o valor total da chuva foi superior a 40 mm.

A Figura 31 mostra a porcentagem de variação das vazões máximas, observadas e simuladas, no processo de calibração. Nessa figura observa-se que os valores variaram em uma faixa -22 a 58%, resultados da simulação dos eventos 10 (Figura 21) e 11 (Figura 30), respectivamente. O valor médio da variação de vazão máxima foi de 19,3% em módulo 25,4%. Esse valor médio foi influenciado pelos eventos 02, 07 e 11, pertencentes ao grupo 3, que obtiveram menor eficiência. Com as retiradas desses eventos do cálculo da média, teve-se o valor de 9,2%, portanto uma variação inferior a 10%. Neste caso, resta somente o evento 01 com variação da vazão acima de 25%. Nos três eventos do grupo 1, ocorreu uma superestimativa da vazão. O maior valor superestimado foi do evento 10, que apresentou variação 22%. A variação da vazão máxima apontadas nos Grupo 1, 2 e 3 foi de 8,8%, 19,9% e 40,5%, respectivamente. SENARATH et al. (2000) obtiveram, no processo de calibração, uma faixa de variação superior a observada na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho. Os autores observaram que os eventos com maior tempo de base do hidrograma apresentaram melhor desempenho na simulação do modelo TOPMODEL. Todavia, na bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho a observação anterior não foi verificada, não existindo a associação da melhor simulação com duração de base do hidrograma.

A Figura 32 mostra a relação da porcentagem de variação dos volumes escoados observados e simulados pelos eventos. A faixa de variação encontrada no volume escoado foi entre -61 a 12%, sendo estes limites verificados nos eventos 12 e 10. O valor médio da

variação do volume foi de -18,4%, em módulo 21,7%. Retirando a influência dos maiores valores de variação, correspondentes aos eventos 01, 07, 08 e 12, o valor médio passa para -3,4%, em módulo 8,4%. Nos grupos 1, 2 e 3 foram verificadas as variações de volume de 3%, -16% e -23%, respectivamente, e em módulo 10%, 21,2% e 25,1%. Segundo FRANCHINI et al. (1996); SCHULER (1998) e RANZINI (2002), o volume escoado é afetado pela condutividade hidráulica saturada, profundidade de retenção da água, e condições de umidade do perfil do solo. Logo a definição de parâmetros é fundamental para melhor desempenho na simulação dos volumes dos hidrogramas.

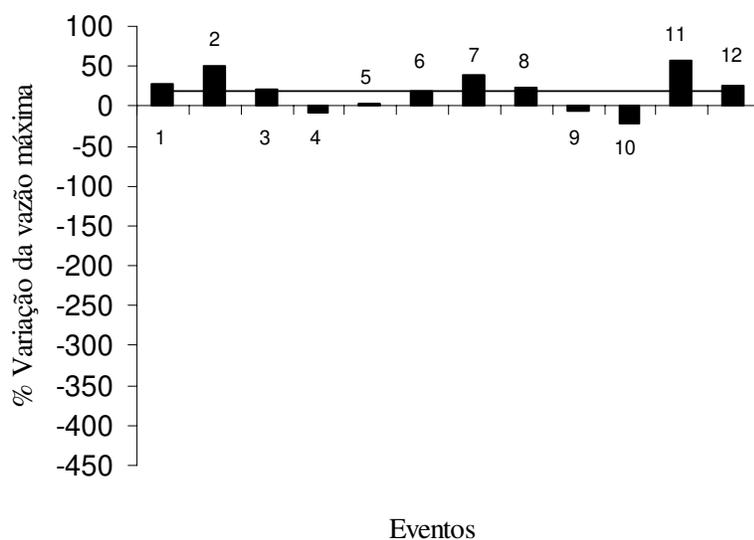


Figura 31 - Porcentagem de variação da vazão máxima simulada para os eventos no processo de calibração pelo modelo TOPMODEL na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho.

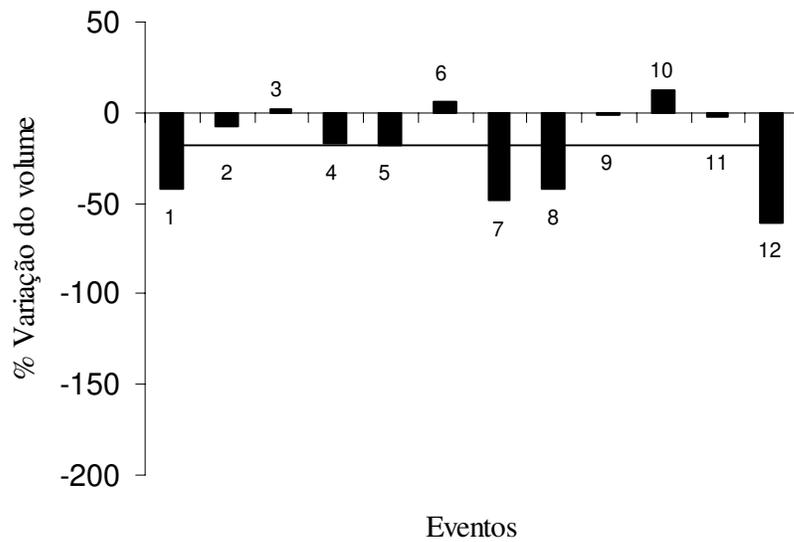


Figura 32 - Porcentagem de variação do volume escoado para os eventos no processo de calibração pelo modelo TOPMODEL na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho.

As hidrógrafas simuladas para toda a calibração foram avaliadas pela consistência da vazão simulada e observada e os volumes de escoamento simulados e observados. Os resultados da comparação entre as vazões simuladas e observadas são mostrados na Figura 33. A inclinação da reta de ajuste da Figura 33 foi calculada igual a 0,86 e o valor de  $R^2$  de 0,75. O valor da inclinação mostra que a simulação tende a subestimar os valores das vazões observadas. Para comparação dos volumes de escoamento simulado e observado foi realizado o mesmo procedimento para os dados das vazões. A Figura 34 mostra a relação dos volumes simulado e observado. Essa figura o coeficiente angular foi calculado igual a 1,03 e o valor de  $R^2$  foi de 0,95. Esse resultado mostra uma pequena tendência do modelo em superestimar os volumes escoados.

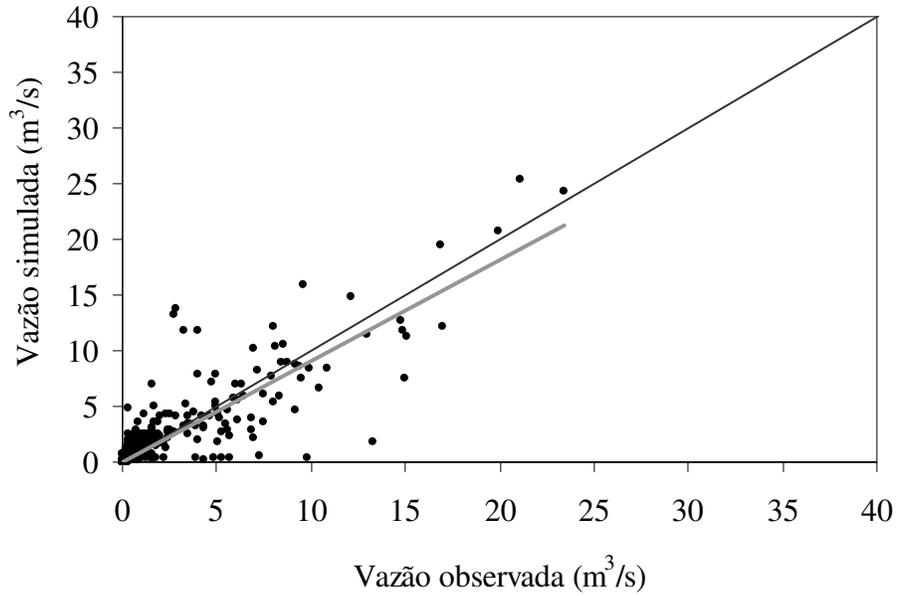


Figura 33 - Vazão observada versus simulada para os eventos na calibração pelo modelo TOPMODEL na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho. Equação de ajuste  $y = 0,9111x$

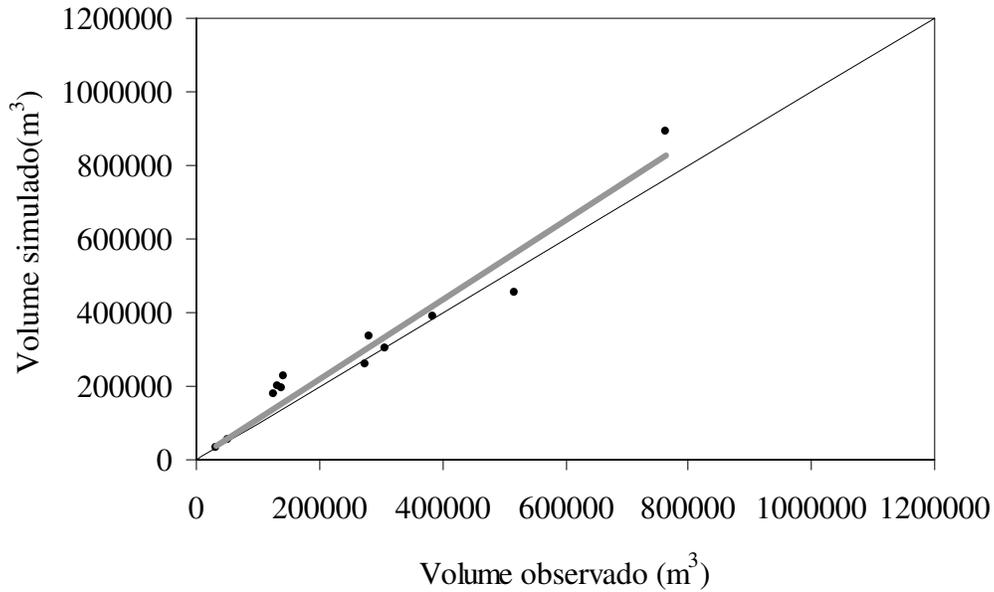


Figura 34 - Volume observado versus simulado para os eventos na calibração pelo modelo TOPMODEL na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho. Equação de ajuste  $y = 1,0858x$

O modelo TOPMODEL utiliza o critério Nash and Sutcliffe para medir sua eficiência na simulação. Nas simulações de calibração observou-se que metade dos eventos simulados registrou uma eficiência maior que 50% (Tabela 7). Foi observado que 5 dos doze eventos simulados apresentaram eficiência acima de 70%, sendo este valor o limite mínimo para considerar uma boa performance da simulação com o modelo TOPMODEL. Os valores de maior eficiência (> 70%) foram verificados nos grupos 1 e 2. Esse resultado foi, também, observado por RANZINI (2002), o qual verificou melhor desempenho e eficiência na simulação do modelo para eventos isolados com precipitações superiores a 20 mm.

#### 5.3.1.2.8. Sensibilidade dos parâmetros

O parâmetro  $m$  revelou-se como dos mais importantes no controle da resposta hidrológica no processo de calibração. Este parâmetro apresentou alta sensibilidade para todos os eventos. A alta sensibilidade para o parâmetro  $m$  foi verificada pelos autores VARELLA e CAMPANA (2000), RANZINI (2002) e COELHO (2003). SCHULER et al. (2000), nas simulações de eventos isolados, encontrou que o parâmetro  $m$  mostrou baixa sensibilidade. Segundo MINE e CLARKE (1996) e VARELLA e CAMPANA (2000), o fator  $m$  constitui um parâmetro crítico importante e responsável pela resposta hidrológica do modelo. Outro parâmetro altamente sensível é  $T_o$ , isto se justifica pela sua forte interação com o fator  $m$ , portanto qualquer alteração em um deles provocará interferência no outro.

O parâmetro relacionado ao armazenamento de água no solo  $SR_{max}$ , teve na calibração dos eventos uma baixa sensibilidade. SCHULER et al. (2000) e KIM et al. (1997), encontraram valores moderadamente sensíveis para este parâmetro. A sensibilidade encontrada nesta simulação foi contrária ao comportamento deste parâmetro nas aplicações de VARELLA e CAMPANA (2000) e COELHO (2003), onde  $SR_{max}$  apresentou-se altamente sensível.

Já para a velocidade de propagação da onda de cheia, o modelo também apresentou baixa sensibilidade, mostrando que nestas condições a resposta da bacia será a mesma, não sendo afetada pelos fatores que interferem na propagação da onda no canal.

Durante o processo de calibração percebeu-se que nos pequenos eventos, o modelamento tornou-se mais sensível à variação dos parâmetros.

### 5.3.1.3. Processo de validação do modelo TOPMODEL

#### 5.3.1.3.1. Simulação de validação 1

Os parâmetros depois de calibrados foram submetidos ao processo de validação aplicado em dezesseis eventos. A simulação dos dezesseis eventos pode ser visualizada nas figuras de 35 a 50 e, respectivas representações, no Apêndice C. A Tabela 8 apresenta a caracterização dos eventos escolhidos para validar o processo de validação do modelo TOPMODEL.

Tabela 8- Caracterização dos eventos utilizados no processo de validação 1 e 2 no modelo TOPMODEL na Bacia do Ribeirão dos Marins seção Monjolinho – Piracicaba– SP.

Evento	Período	Intervalo de base do hidrograma (h)	Precipitação total (mm)	Vazão máxima observada (m <sup>3</sup> /s)	Volume escoado observado (m <sup>3</sup> )	Coefficiente de escoamento (%)
1	05 a 07/01/99	43	60,9	8,4	501612	37,4
2	01 a 02/02/99	28	6,7	4,9	133277	45,2
3	07 a 11/02/99	99	33,7	1,4	177675	23,9
4	20 a 22/02/99	50	41,3	4,2	226238	24,9
5	23 a 24/02/99	26	5,3	0,7	32612	13,9
6	06 a 08/05/99	40	20,3	1,6	73882	8,3
7	14 a 18/06/99	106	26,9	0,5	45728	7,7
8	01 a 03/01/00	56	100,8	7,3	518586	23,4
9	31/01 a 03/02/00	67	37,7	1,3	81855	9,9
10	10 a 15/02/00	117	108,1	8,6	642354	26,9
11	28/02 a 02/03/00	74	54,2	1,6	87406	7,3
12	21 a 22/03/00	31	47,7	5,6	159568	15,2
13	28 a 30/03/00	41	36,7	7,9	235949	29,2
14	01 a 04/09/00	78	38,8	2,2	102766	12,0
15	24 a 27/11/00	71	57,9	5,6	200033	15,7
16	04 a 07/12/00	91	36,8	2,3	145375	17,9

Na Tabela 8 verifica-se que a vazão máxima observada ocorreu no evento 10, que apresenta o valor da chuva de 8,6 mm. O menor valor de vazão máxima ocorreu no evento 07, com valor de chuva de 26,9 mm. Nos eventos 13 e 16, com valores de chuva semelhantes, apresentaram vazões com 71% de diferença.

Em nenhum dos eventos foi encontrado um coeficiente de escoamento acima de 50%. No evento 02 foi verificado o maior valor do coeficiente para um dos menores valores de

precipitação entre os eventos da validação. O menor coeficiente de escoamento foi verificado nos eventos 07 e 11, sendo que no evento 11 o valor precipitado foi o dobro do evento 07. Também foi, verificado, como no processo de calibração, que não existe uma relação linear entre o volume precipitado e o escoado.

No evento 01 (Figura 35 e C1-ApêndiceC), o modelo não reproduziu a forma da hidrógrafa observada. A vazão máxima simulada foi em torno de 40% maior que observada, defasando no tempo de pico em 4 horas sendo coincidentes o final da curva de recessão.

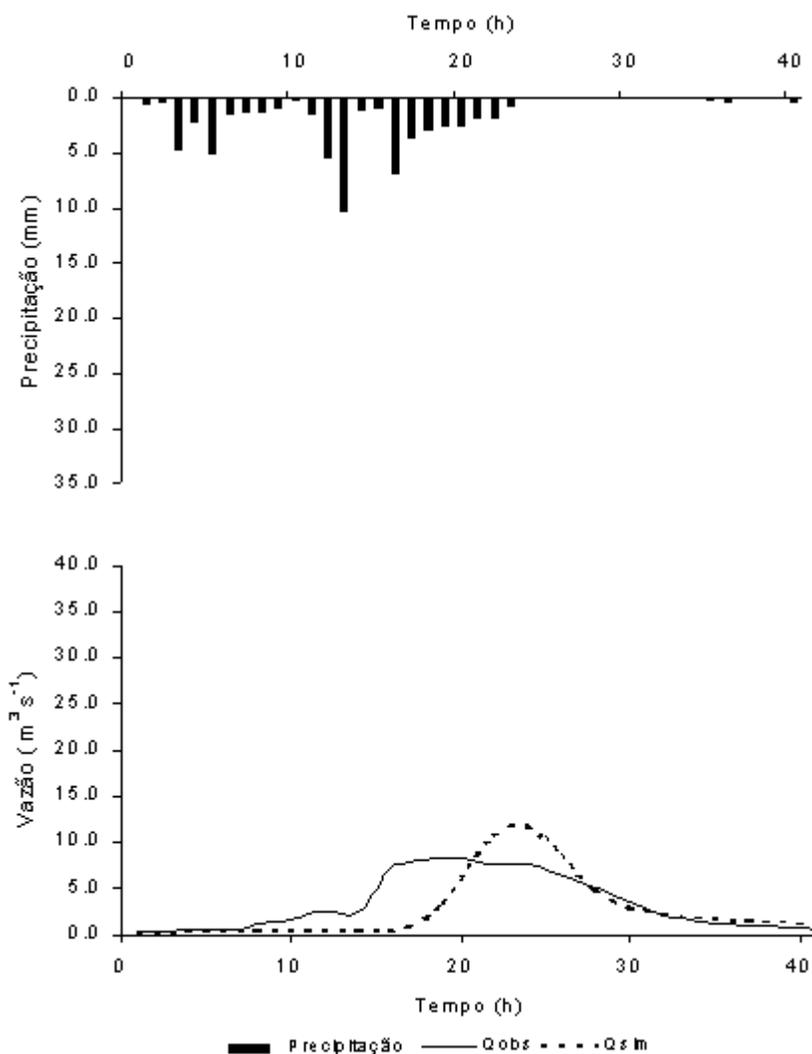


Figura 35 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação, utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 01 no período de 05 a 07/01/99 – 43 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba–SP.

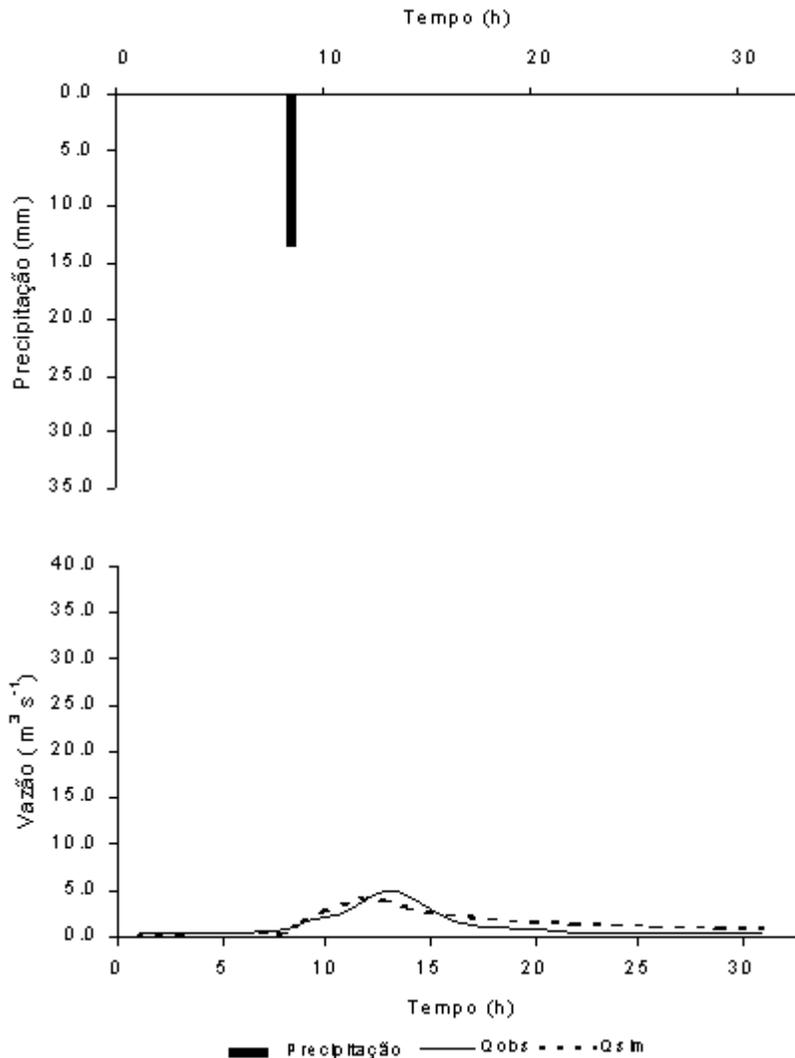


Figura 36 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação, utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 02 no período de 01 a 02/02/99 – 28 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho –Piracicaba–SP.

Para o evento 02 (Figura 36 e C2 – Apêndice C) o desempenho do modelo foi melhor que no evento 01 apresentando vazão máxima simulada inferior em 16% a observada. A diferença entre os volumes de escoamento foi de 19% com adiantamento do tempo de pico simulado em uma hora.

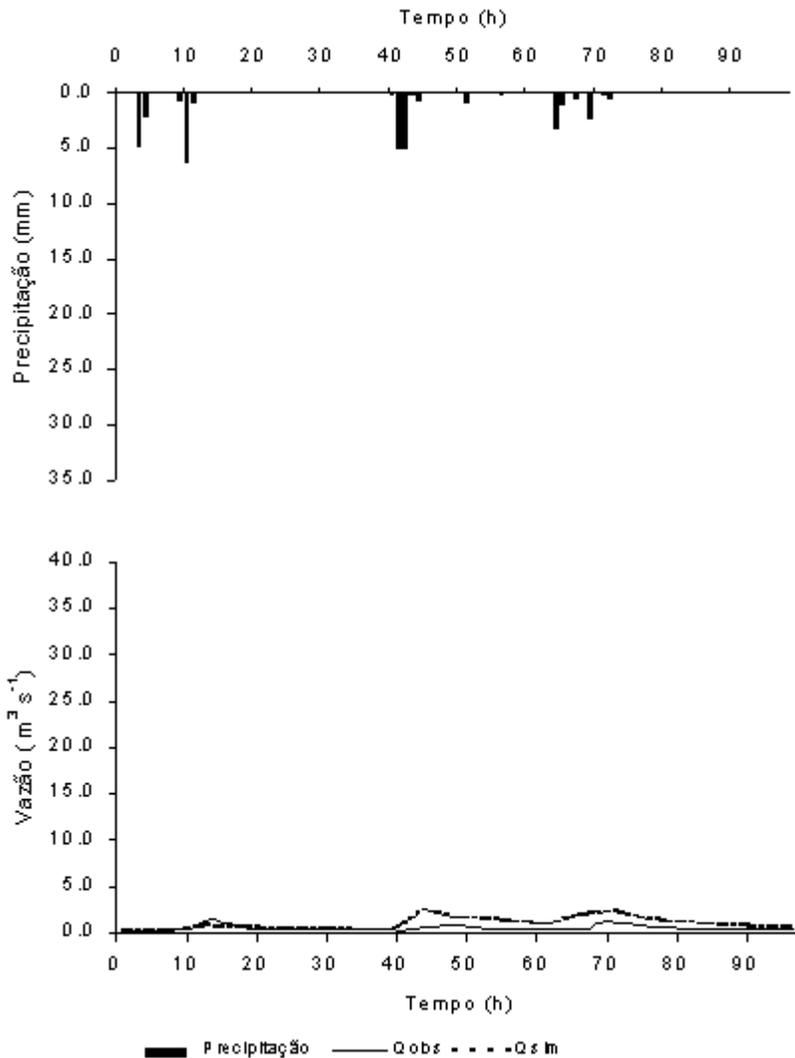


Figura 37 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação, utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 03 no período de 07 a 11/02/99 – 99 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho –Piracicaba–SP.

No caso do evento 03 (Figura 37 e C3 – Apêndice C), dos três picos de vazão simulados, em dois deles ocorreram superestimação de 73%. No primeiro pico de vazão simulado houve uma subestimação de 49%. O volume simulado foi 95% superior ao observado. O tempo de pico foi adiantado em uma hora para o primeiro pico e de três horas para o segundo pico simulado. No terceiro pico de vazão ocorreu defasagem de uma hora.

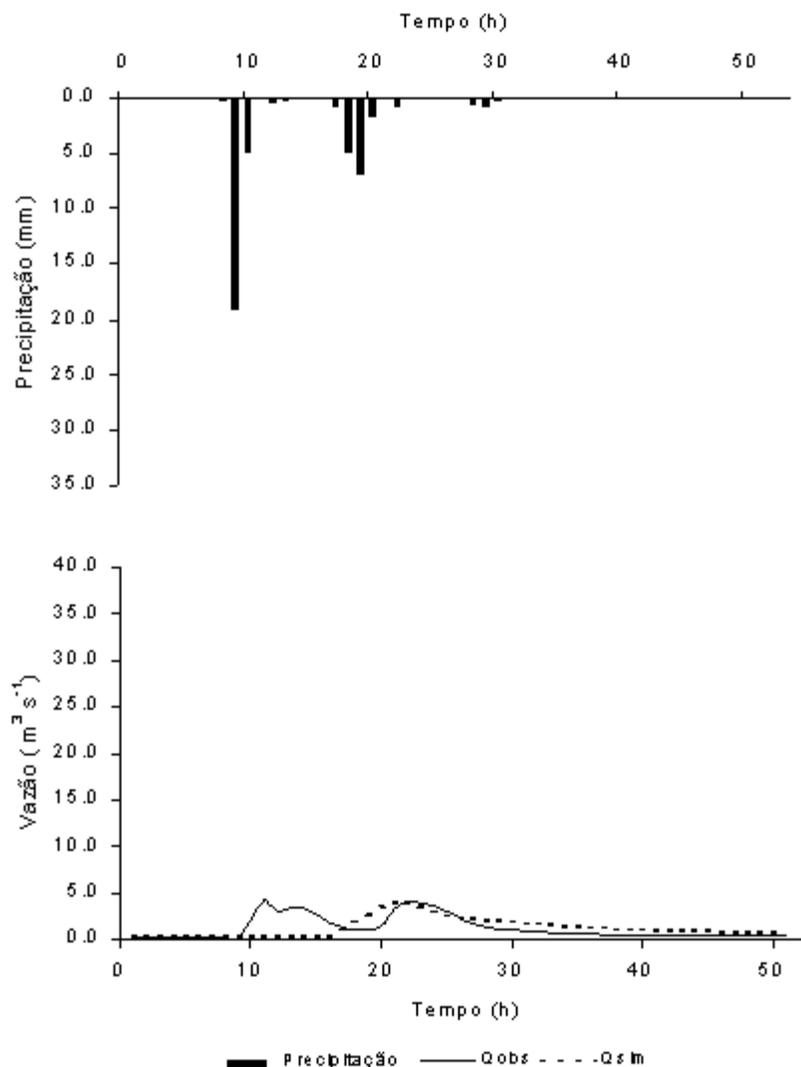


Figura 38 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação, utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 04 no período de 20 a 22/02/99 – 50 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba–SP.

No evento 04 (Figura 38 e C4 – Apêndice C), a simulação gerou uma vazão máxima inferior a 10% da vazão máxima observada. O volume de escoamento simulado de 6%. O tempo de pico adiantado em uma hora em relação a hidrógrafa observada. O início da simulação do escoamento superficial foi 10 horas após o início do observado. Neste evento o primeiro pico de vazão observado não foi simulado.

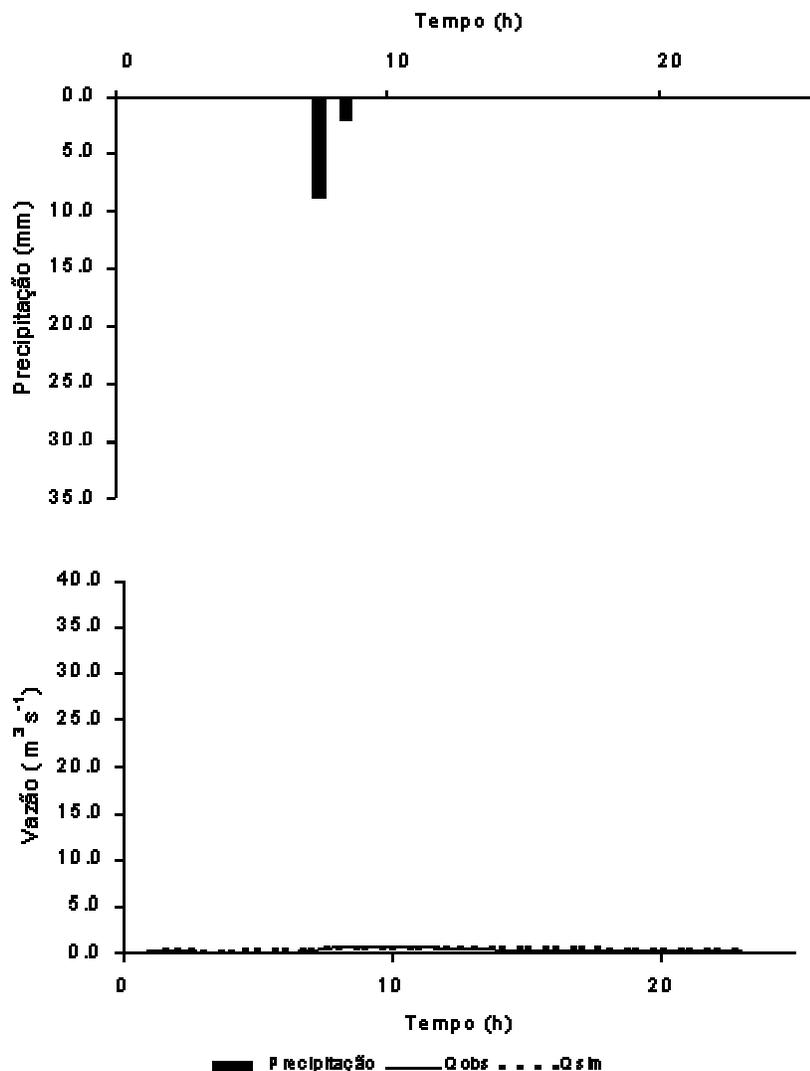


Figura 39 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação, utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 05 no período de 23 a 24/02/99 – 26 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba–SP.

No evento 05 mostrado na Figura 39 e C5 – Apêndice C, o início do escoamento superficial foi adiantado em 2 horas. Este evento apresentou o tempo de pico das vazões máximas coincidentes. A curva de recessão mostrou-se praticamente constante a partir do tempo de pico. O modelo apresentou comportamento semelhante nas simulações dos eventos 02 (Figura 28) e 11 (Figura30) no processo de calibração.

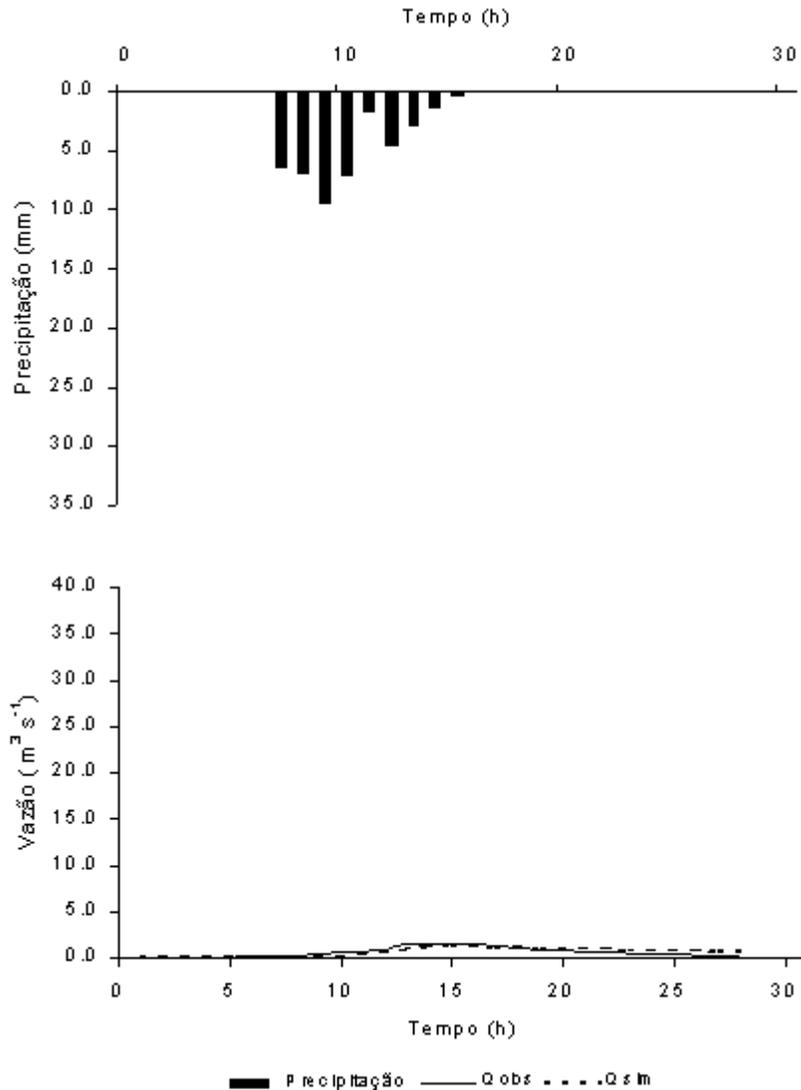


Figura 40 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação, utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 06 no período de 06 a 08/05/99 – 40 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba–SP.

No evento 06 (Figura 40 e C6 – Apêndice C), a vazão máxima simulada foi subestimada em 18%. O tempo de início do escoamento foi defasado de 3 horas, e o tempo de pico de vazão simulada de uma hora. Com relação à curva de recessão teve-se comportamento semelhante ao evento 05.

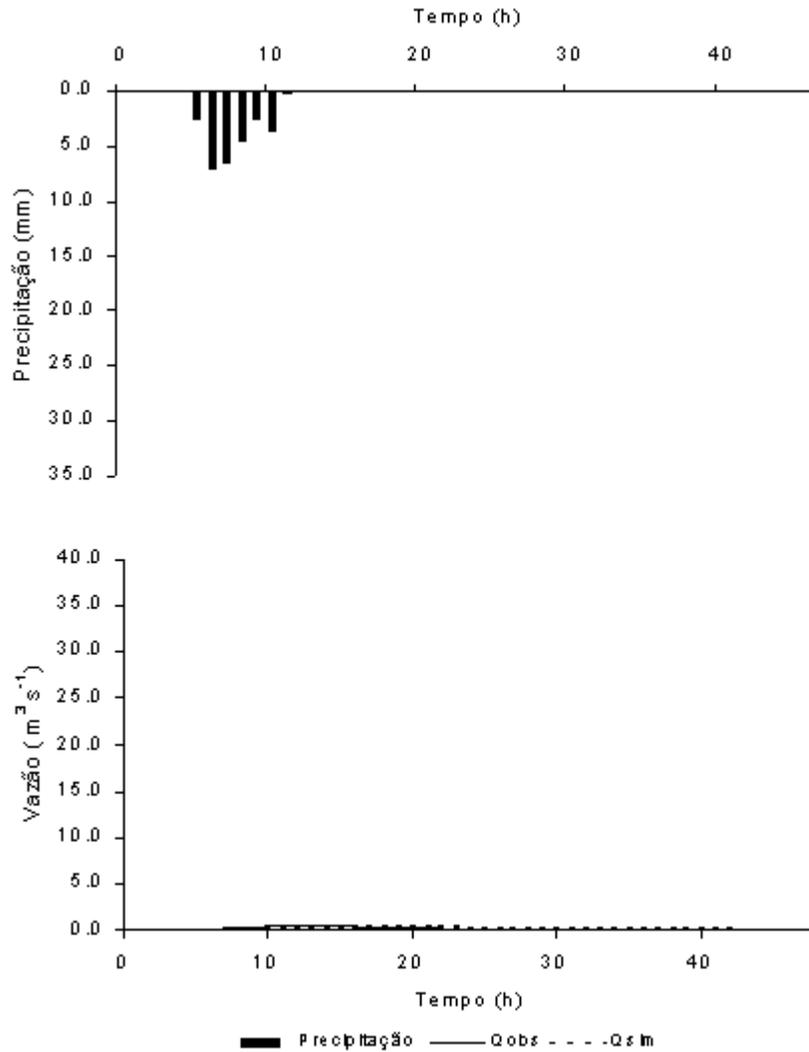


Figura 41 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação, utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 07 no período de 14 a 18/06/00 – 106 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP.

Para o evento 07, ilustrado na Figura 41 e C7 – Apêndice C, a vazão máxima simulada foi 39% menor que a observada. O tempo de pico foi adiantado em duas horas. Foi verificada semelhança na forma da curva de recessão da hidrógrafa simulada no evento 05 (Figura 39). A diferença entre estes eventos foi com relação ao tempo de início da simulação do escoamento.

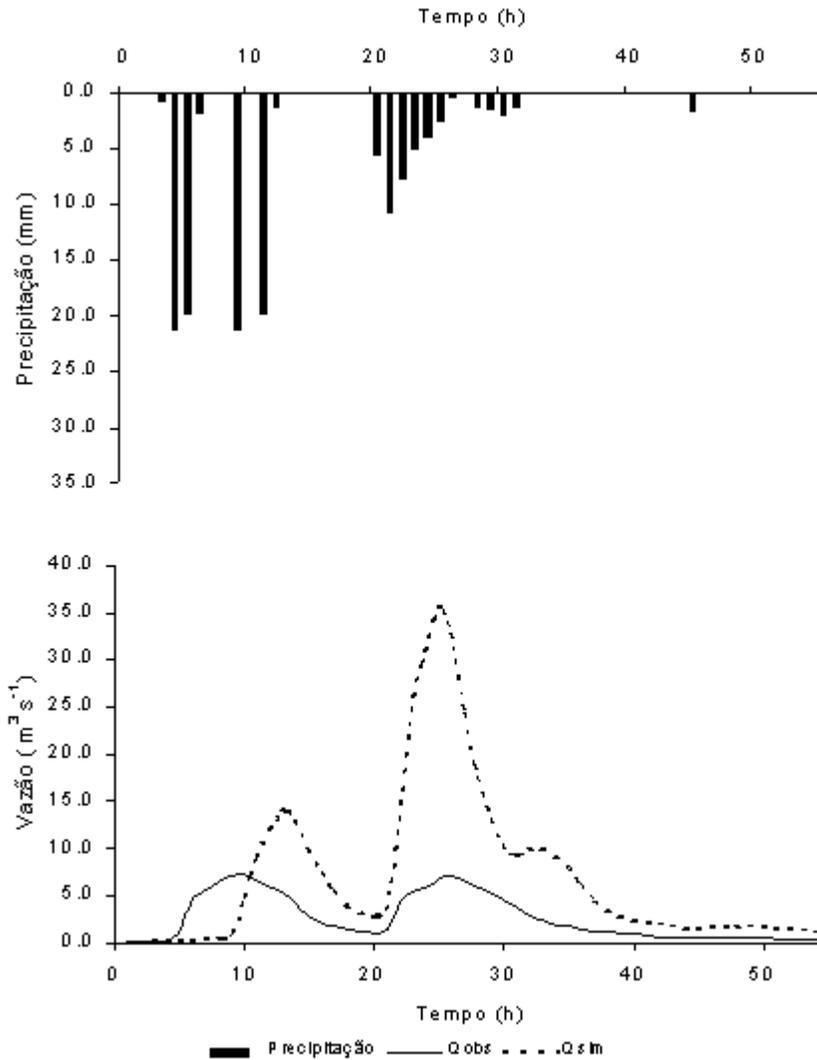


Figura 42 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 08 no período de 01 a 03/01/00 – 56 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho –Piracicaba – SP.

No evento 08 (Figura 42 e C8 – Apêndice C) os dois picos de vazão simulados foram superestimados em 91% e 400%, o mesmo aconteceu com o volume de escoamento que superou em 165% os valores observados.

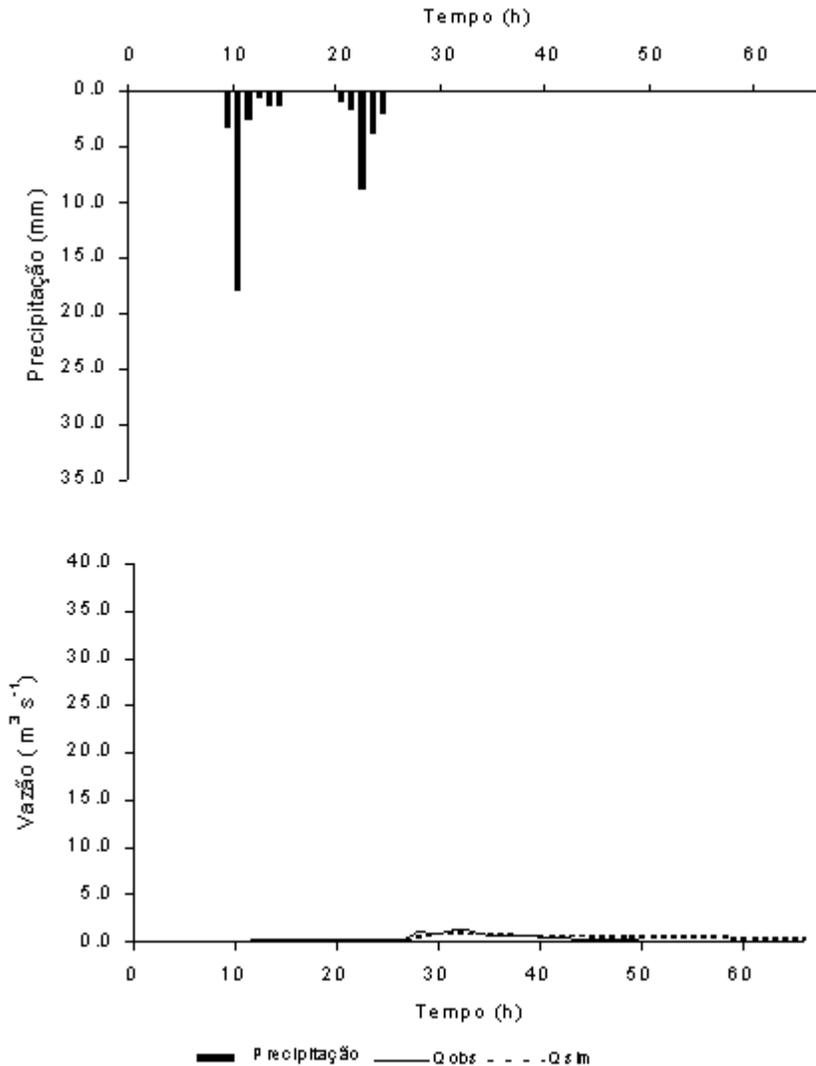


Figura 43 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação, utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 09 no período de 31/03 a 03/04/00 – 67 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho –Piracicaba – SP.

No evento 09 (Figuras 43 e C9 – Apêndice C) a forma da hidrógrafa da vazão simulada foi bem diferente da observada. Na simulação da vazão máxima houve uma subestimação de 32% e o volume escoado ficou 0,8% menor que o observado. O tempo de início do escoamento superficial simulado foi atrasado de 15 horas.

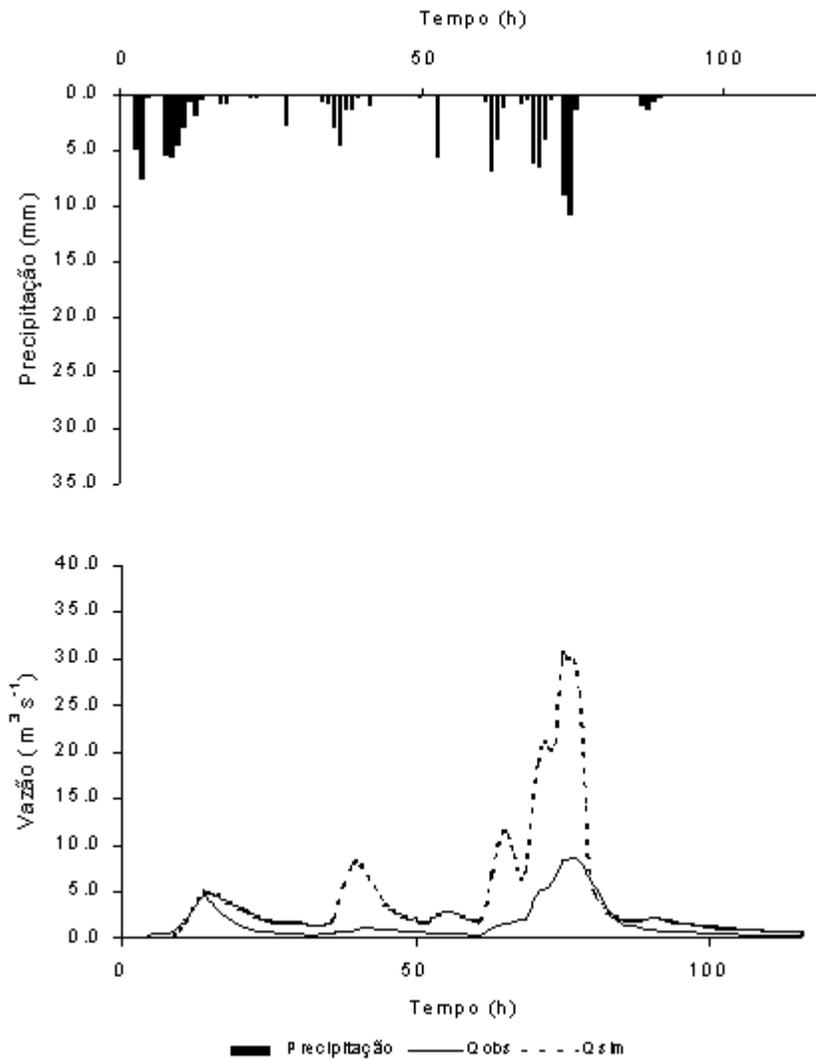


Figura 44 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação, utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 10 no período de 10 a 15/02/00 – 117 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP.

No evento 10 (Figura 44 e C10 – Apêndice C), para os três picos de vazão simulados foi verificado que o primeiro pico simulado acompanhou bem o observado. O primeiro pico simulado apresentou-se superior em 9% ao pico de vazão máxima observado. Enquanto, nos outros dois picos simulados ocorreram superestimativa da vazão sendo que a variação maior foi no terceiro. No terceiro pico de vazão máxima simulada ocorreu uma superestimativa de 268% da vazão observada com valor de 8,11 m<sup>3</sup>/s.

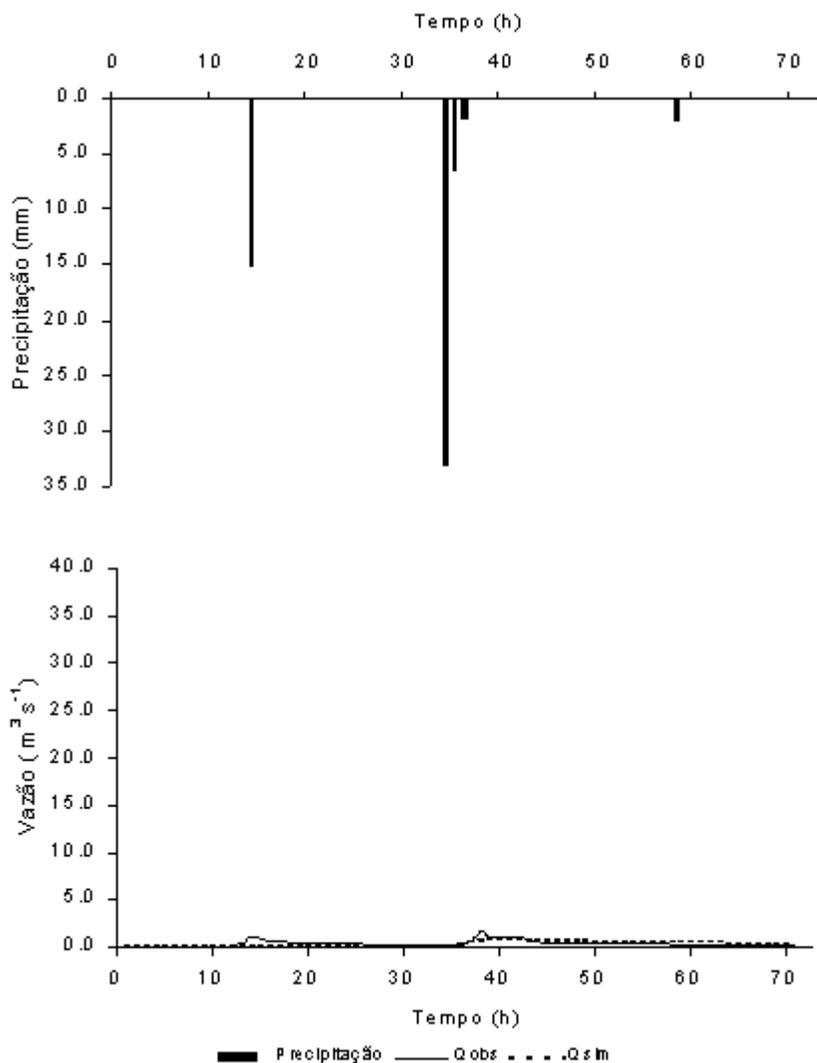


Figura 45 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação, utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 11 no período de 28/02 a 02/03/00 – 74 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho –Piracicaba – SP.

No evento 11 (Figura 45 e C11 – Apêndice C) o modelo simulou de maneira semelhante o evento 09 do processo de validação. O primeiro pico de vazão observado não foi simulado quando ocorreu uma chuva de 15 mm. No segundo pico ocorreu uma subestimação da vazão máxima em torno de 49%, e o volume escoado próximo de 19% daquele apresentado pelo observado.

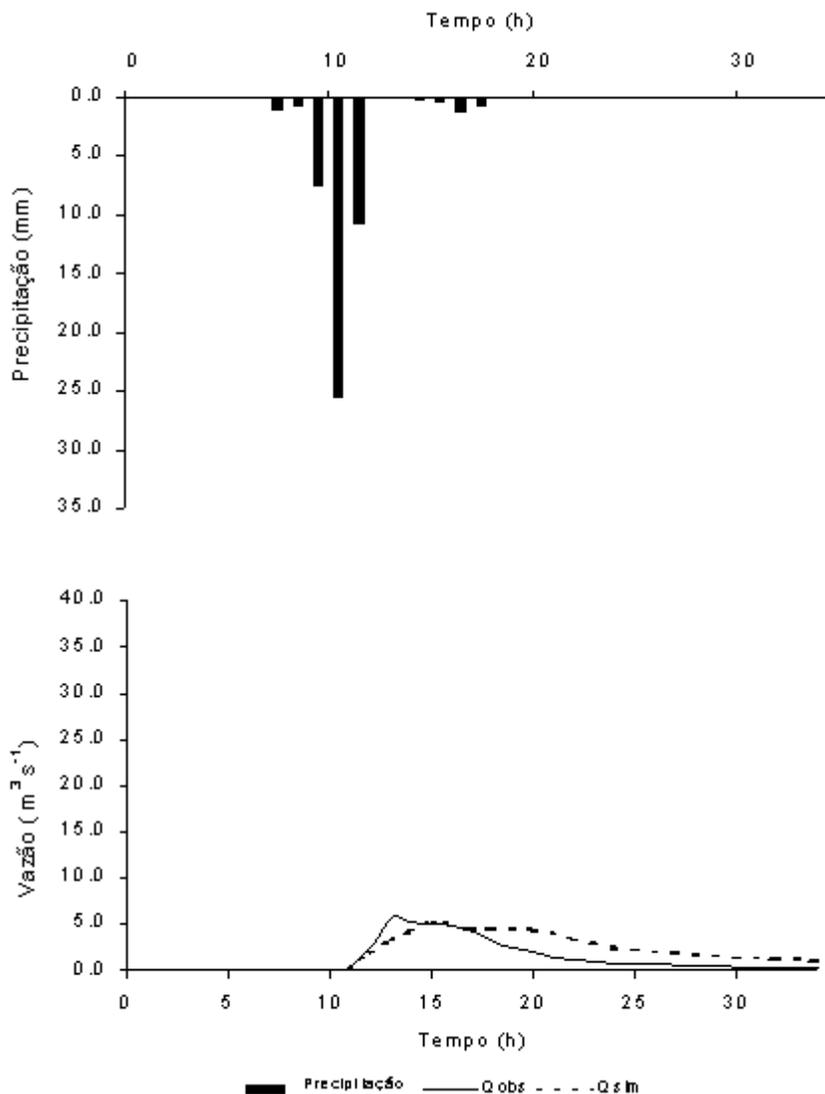


Figura 46 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação, utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 12 no período de 21 a 22/03/00 – 31 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP.

No evento 12 (Figura 46 e C12 – Apêndice C), houve semelhanças com relação à forma das hidrógrafas, porém, o volume simulado foi superior que observado. O volume simulado foi acima do observado em 49%. O pico máximo da vazão simulada foi inferior em 9%, sendo coincidentes o tempo de início do escoamento.

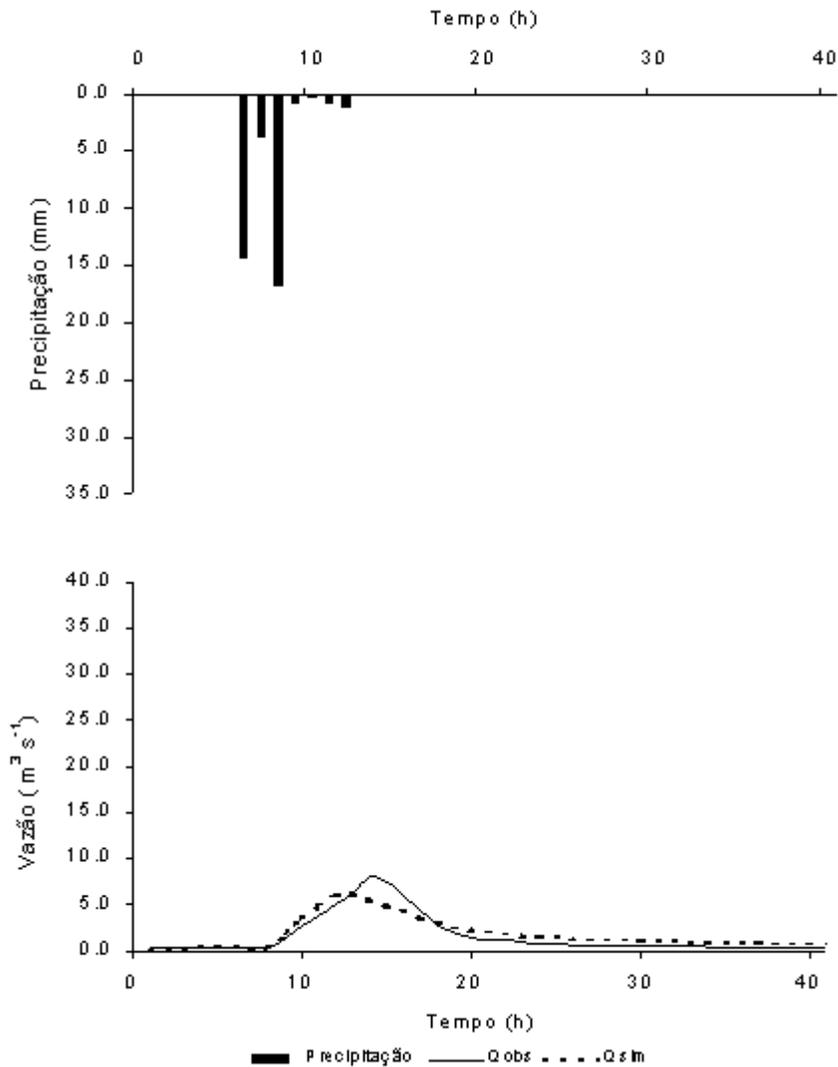


Figura 47 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação, utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 13 no período de 28 a 30/03/00 – 41 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP.

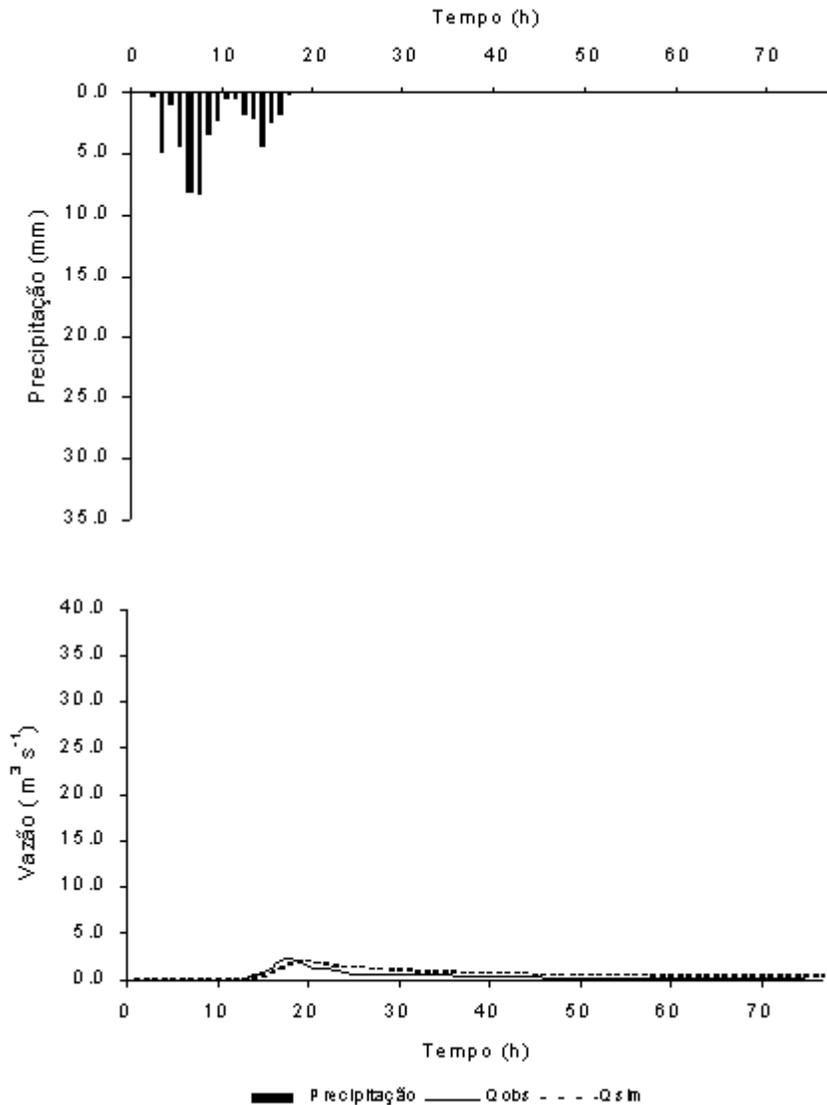


Figura 48 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação, utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 14 no período de 01 a 04/09/00 – 78 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP.

Nas hidrógrafas relativas aos eventos 13 (Figura 47 e C13 – Apêndice C) e 14 (Figuras 48 e C14 – Apêndice C), obteve-se uma boa simulação. No evento 13 ocorreu um adiantamento do pico de vazão máxima de uma hora. O volume escoado e a vazão de pico

foram menores em 10% e 23%, respectivamente, em relação ao observado. Enquanto que no evento 14 (Figura 48) a vazão máxima simulada foi inferior a 10%.

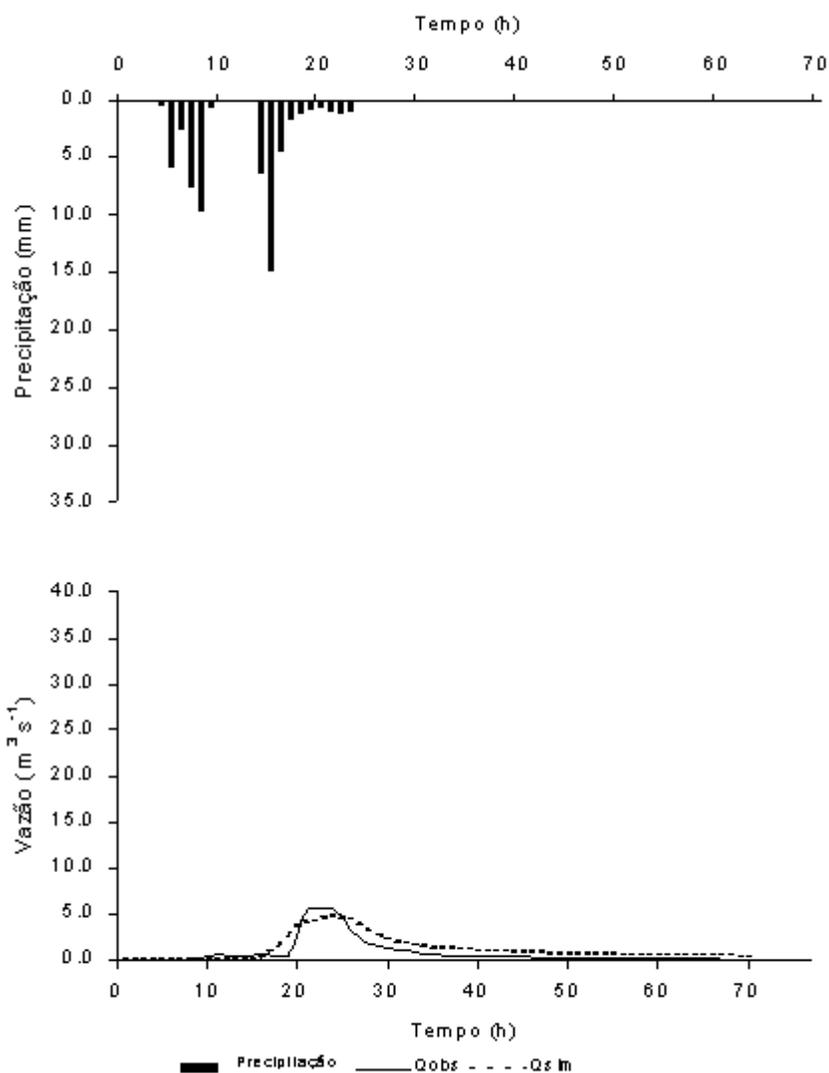


Figura 49 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação, utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 15 no período de 24 a 27/11/00 – 71 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho –Piracicaba – SP.

No evento 15 (Figura 49 e C15 – Apêndice C) verificou-se que o pico de vazão máxima simulada foi 16% mais baixo que a máxima observada. Um volume simulado de 48%

maior que o volume observado. O tempo de pico da vazão máxima simulada foi atrasado em duas horas.

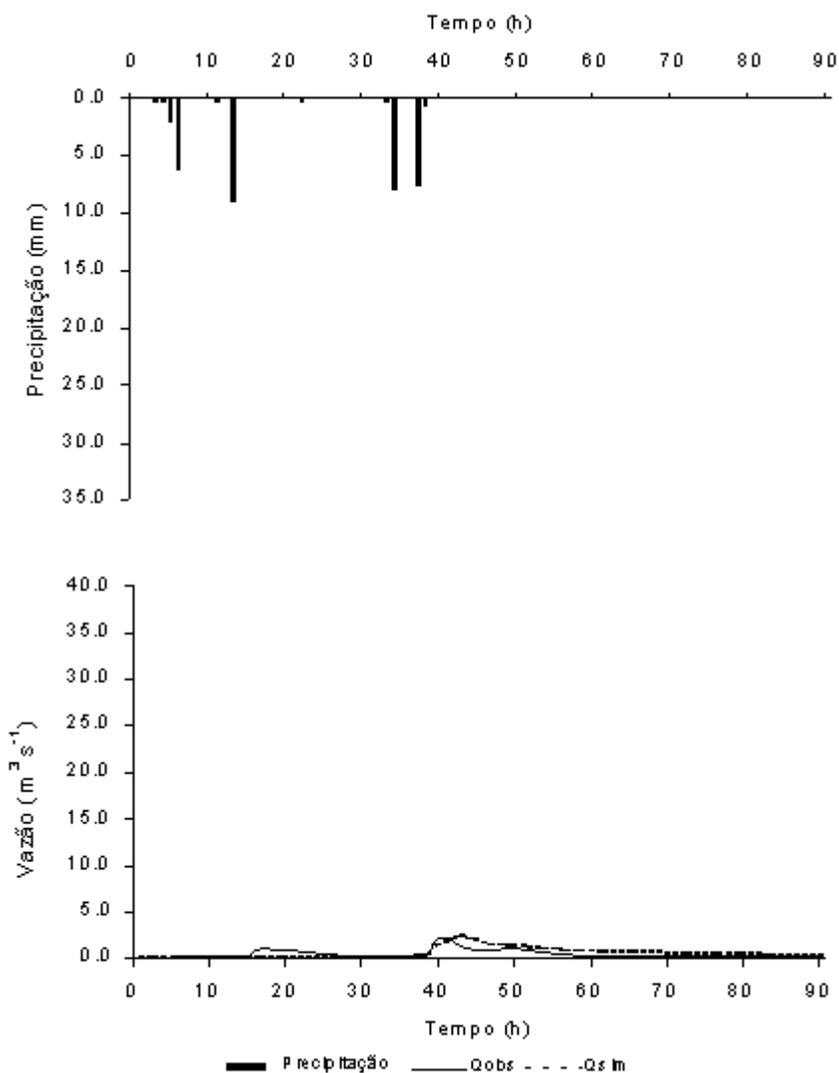


Figura 50 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação, utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 16 no período de 04 a 07/12/00 – 91 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho –Piracicaba – SP.

No evento 16 (Figuras 50 e C16 – Apêndice C) foi simulado apenas um pico de vazão correspondente ao segundo evento de precipitação. Este pico de vazão simulado apresentou 0,4% maior que observada. O volume simulado foi inferior em 15% em relação ao observado.

A tabela 9 mostra os valores dos parâmetros utilizados no primeiro procedimento de validação.

Tabela 9- Valores do déficit inicial ajustados de umidade na zona das raízes ( $SR_o$ ) e a eficiência de Nash e Sucliffe ( $E$ )<sup>(1)</sup> para os eventos utilizados no processo de validação 1

Evento	Período	$SR_o$ (mm)	$E^{(1)}$
1	05 a 07/01/99	42,1	0,09
2	01 a 02/02/99	3,1	0,70
3	07 a 11/02/99	10,1	-5,75
4	20 a 22/02/99	12,1	-7,33
5	23 a 24/02/99	68,0	0,47
6	06 a 08/05/99	29,9	0,65
7	14 a 18/06/99	21,9	0,36
8	01 a 03/01/00	39,9	-10,85
9	31/01 a 03/02/00	16,4	-56,01
10	10 a 15/02/00	16,2	-6,06
11	28/02 a 02/03/00	1,2	-9,41
12	21 a 22/03/00	26,2	0,68
13	28 a 30/03/00	22,8	0,86
14	01 a 04/09/00	31,1	0,43
15	24 a 27/11/00	35,9	0,72
16	04 a 07/12/00	4,6	-11,44

$$^{(1)} E = 1 - \frac{\text{Soma dos quadrados dos erros}}{(\text{Variância da vazão observada})^2}$$

Na Tabela 9 observa-se que o modelo apresentou um melhor ajuste entre o observado e simulado em 30% dos eventos considerando a eficiência acima de 50%. Quando a eficiência é negativa, segundo Beven et al. 1995 citado por RANZINI (2002), o resultado da simulação do modelo é inferior a hipótese da consideração de vazão média de todo período do evento.

A variação média da vazão máxima foi em torno de  $-31\%$  (Figura 51). A variação de volume médio simulado foi de  $-40\%$  (Figura 52). Os eventos 08 e 10 foram aqueles que apresentaram maior variação tanto para a vazão quanto para o volume simulado. A média da variação da vazão calculada sem a interferência destes eventos foi de  $10,2\%$ . Com relação ao valor médio da variação do volume, sem os eventos 08 e 10, foi de  $-21,2\%$ . Do total dos eventos cerca de  $18\%$  apresentaram uma variação da vazão acima do valor médio. Uma diferença superior a  $50\%$  entre os volumes simulado e observado foi verificada em  $25\%$  dos eventos.

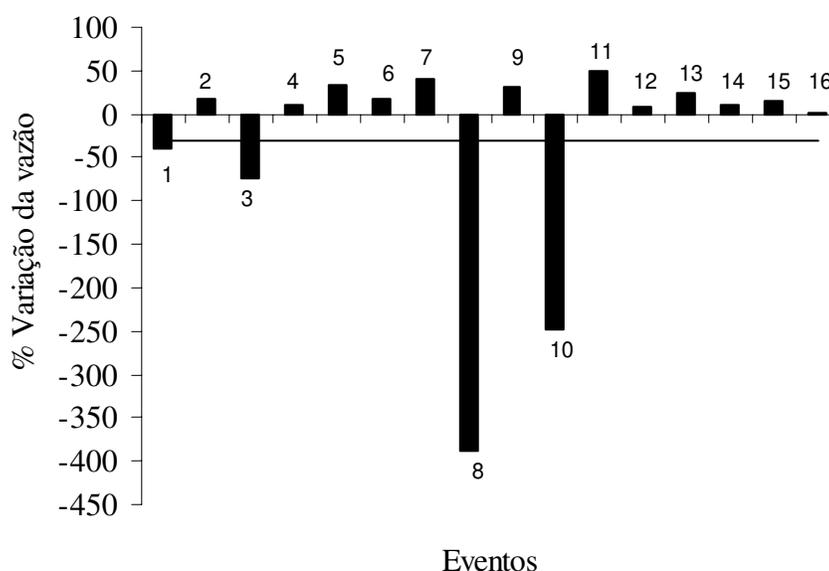


Figura 51 - Porcentagem de variação da vazão máxima simulada para os eventos no processo de validação pelo modelo TOPMODEL na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho.

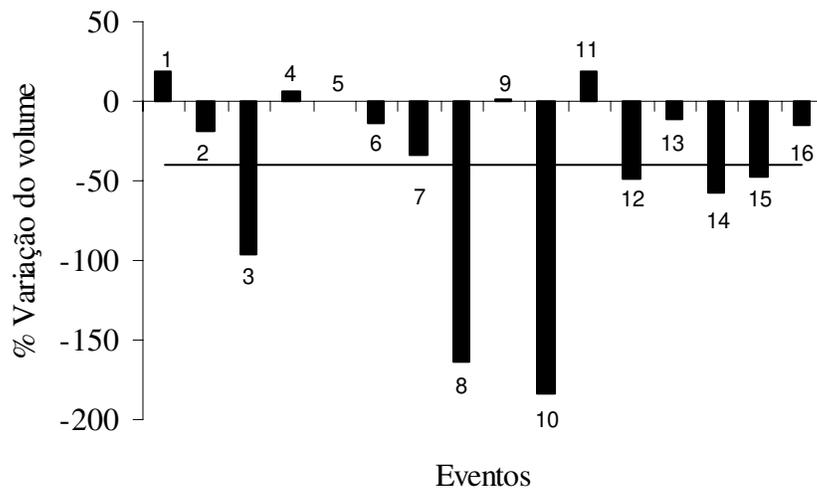


Figura 52 - Porcentagem de variação do volume escoado para os eventos no processo de validação pelo modelo TOPMODEL na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho.

A dispersão entre a vazão observada e simulada no processo de validação<sup>1</sup> é apresentada na figura 53. Nesta figura pode-se observar que houve uma tendência de superestimar os valores de vazão máxima. A maior diferença encontrada nesta correlação entre as vazões observadas e simuladas foi superior a 5 vezes na vazão simulada no evento 08, que pode ser visualizado na Figura 42. A equação de ajuste entre as vazões máximas observadas e simuladas apresentou valor de  $R^2$  de 0,50 significativo a 5%. A inclinação da reta de ajuste dos dados de vazão foi de 0,1637.

A dispersão entre o volume observado e simulado nos eventos validados pelo procedimento 1 são mostrados na Figura 54. Os eventos 08 e 10 apresentaram os valores mais discrepantes entre os volumes. A diferença apresentada por estes eventos foi de 1,64 e 1,84% no volume simulado. Os valores da dispersão mostraram tendência a superestimar o volume simulado. Os valores menores que 500000 m<sup>3</sup> mostraram uma melhor correlação. A reta de ajuste dos dados de volume foi  $y = -2,3841x - 132527$ . Na equação de correlação o valor de  $R^2$  igual a 0,79, significativo a 5%.

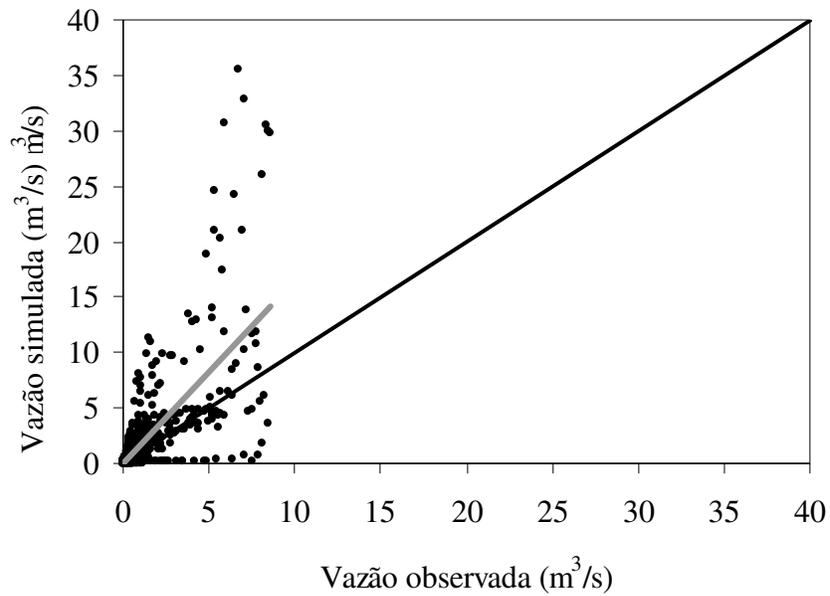


Figura 53 - Vazão observada versus simulada para os eventos na validação1 pelo modelo TOPMODEL na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho. Equação de ajuste  $y = 1,658x$

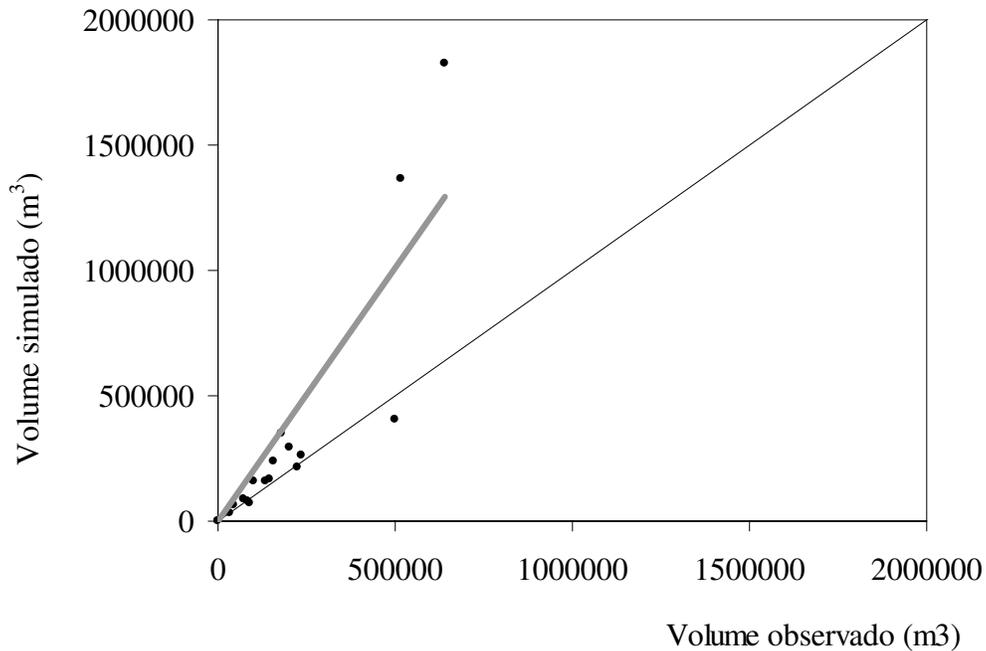


Figura 54 - Volume observado versus simulado para os eventos no processo de validação1 pelo modelo TOPMODEL na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho. Equação de ajuste  $y = 2,0154x$

### 5.3.1.3.2. Simulação validação 2

Durante o processo de calibração foi observado que o parâmetro  $m$  apresentou-se mais sensível na simulação dos eventos. Portanto, este parâmetro foi escolhido para compor uma relação com a precipitação, e por meio dela estimar seus valores a serem empregados no processo de validação. Os valores de  $m$  correspondentes aos pontos de máximo, médio e mínimo encontrados no processo da calibração foram considerados para compor a relação. A partir desta relação foram obtidos os valores de  $m$  em função da chuva ocorrida no evento para proceder a validação do modelo, mantendo os demais parâmetros constantes. Esta relação entre os valores de  $m$  e da precipitação é mostrado na Figura 55. A equação resultante da relação entre a chuva e o parâmetro  $m$  é dado por  $y = 0,0002x - 0,0012$ , no qual  $y$  representa o armazenamento exponencial ( $m$ ), também denominado de armazenamento exponencial, e  $x$ , a precipitação em mm. A equação apresentou um coeficiente de correlação  $R^2 = 0,99$ , com significância  $\alpha = 0,05$ . As variações dos valores do armazenamento exponencial mostraram-se mais elevados em função do aumento da precipitação ocorrida.

Os resultados da simulação neste processo de validação podem ser visualizados nas figuras 56 a 71 e, as correspondentes, no Apêndice C.

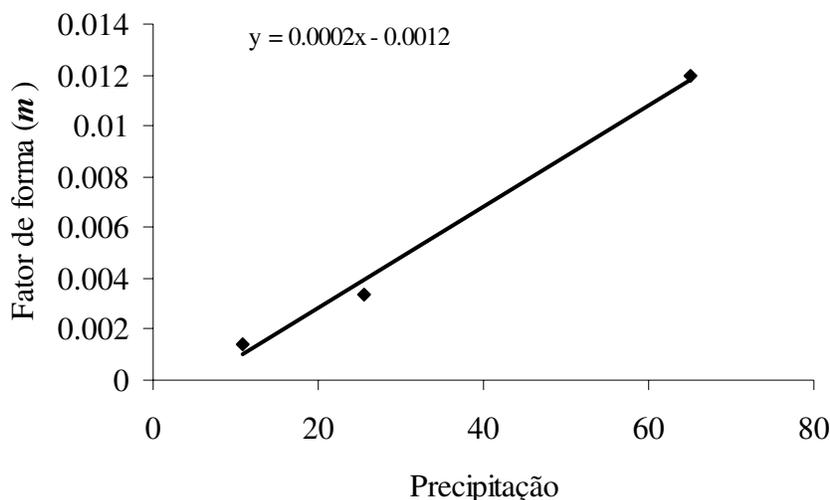


Figura 55 - Equação de regressão entre a precipitação ( $P$ ) e o armazenamento exponencial ( $m$ ), considerando probabilidade ao nível de 5% ( $P < 0,05$ ).

Neste processo de validação ocorreram subestimativas da vazão máxima simulada inferior a 5% nos eventos 01 (Figura 56 e C17 – Apêndice C), 02 (Figura 57 e C18 – Apêndice C), 10 (Figura 65 e C17 – Apêndice C), 12 (Figura 67 e C17 – Apêndice C) e evento 14 (Figura 69 e C17 – Apêndice C). Na faixa entre 5 e 10% nos eventos 05, 08, 09, 11, representados nas Figuras 60 (C21 – Apêndice C), 63(C24 – Apêndice C), 64 (C25 – Apêndice C), 66(C27 – Apêndice C), respectivamente. E, acima de 20% nos eventos 07, 13 e 15, mostrados nas respectivas Figuras 62 (C23 – Apêndice C), 68(C29 – Apêndice C), 70 (C31 – Apêndice C). A superestimação da vazão máxima simulada no evento 03 (Figura 58 e C19 – Apêndice C) foi de 45%, no evento 04 (Figura 59 e C20 – Apêndice C) de 125% e no evento 16 (Figura 71 e C32 – Apêndice C) foi menor que 1,5%, enquanto que no evento 06 (Figura 61 e C22 – Apêndice C) obteve-se o mesmo valor entre as vazões. Os picos de vazão foram coincidentes no evento 15, e nos eventos 09, 11 e 17 no segundo pico de vazão.

Quanto aos volumes simulados as menores variações ocorreram no evento 02 subestimado em menos de 2%, e superestimado no evento 05 (inferior a 1%), e superestimados nos demais.

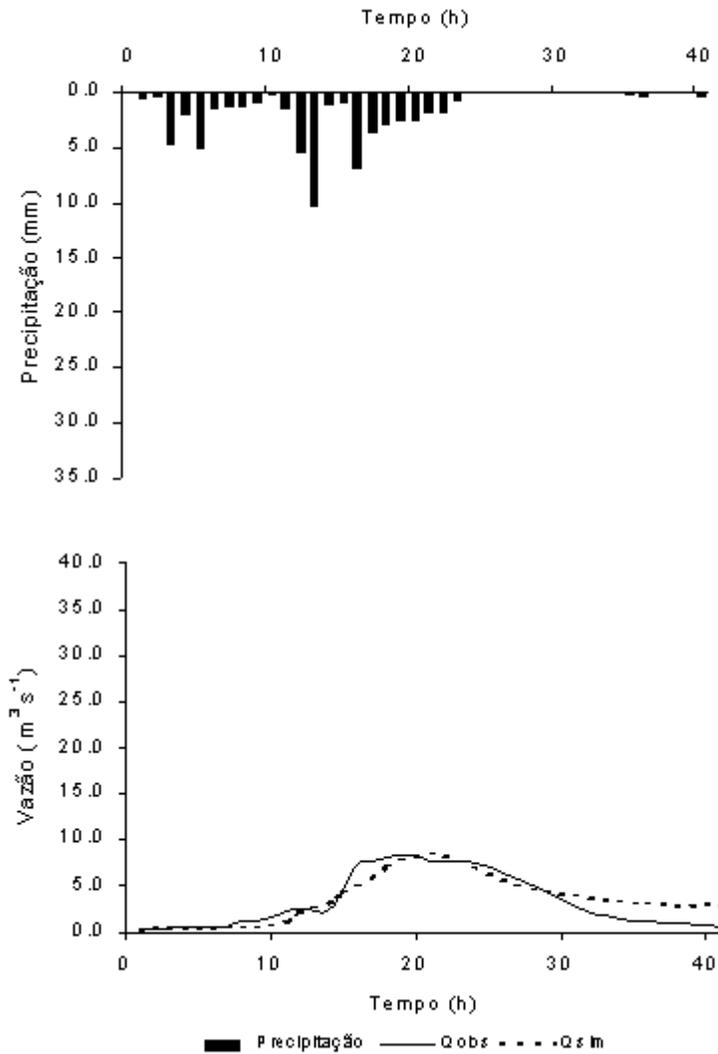


Figura 56 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação pela equação  $y = 0,0002P - 0,0012$ , utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 01 no período de 05 a 07/01/99 – 43 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP.

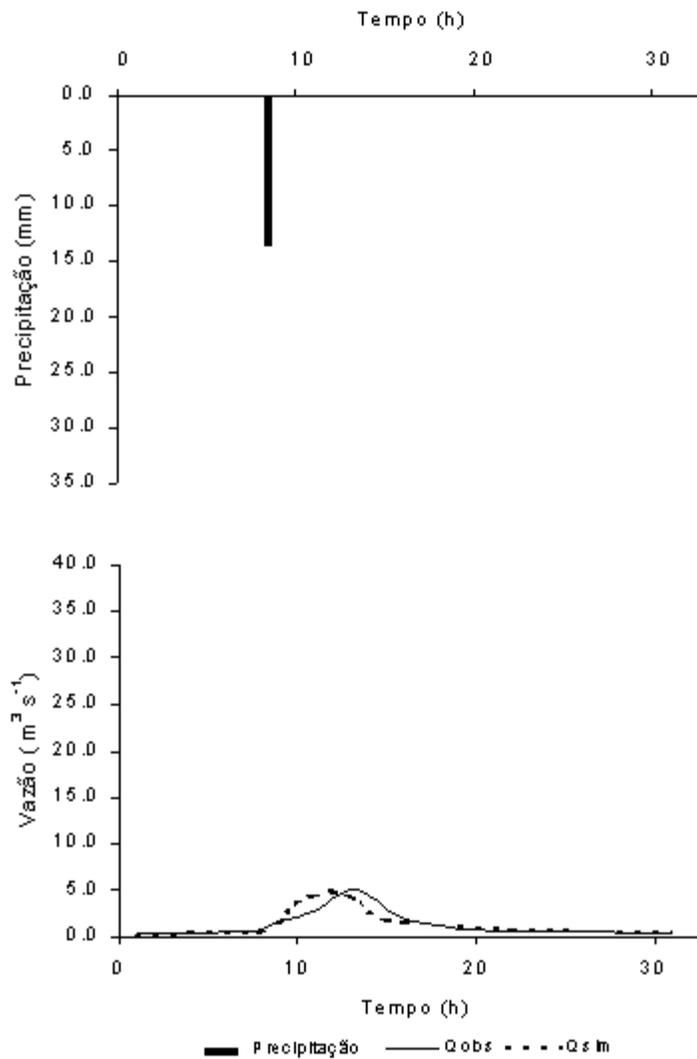


Figura 57 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação pela equação  $y = 0,0002P - 0,0012$ , utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 02 no período de 01 a 02/02/99 – 28 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP.

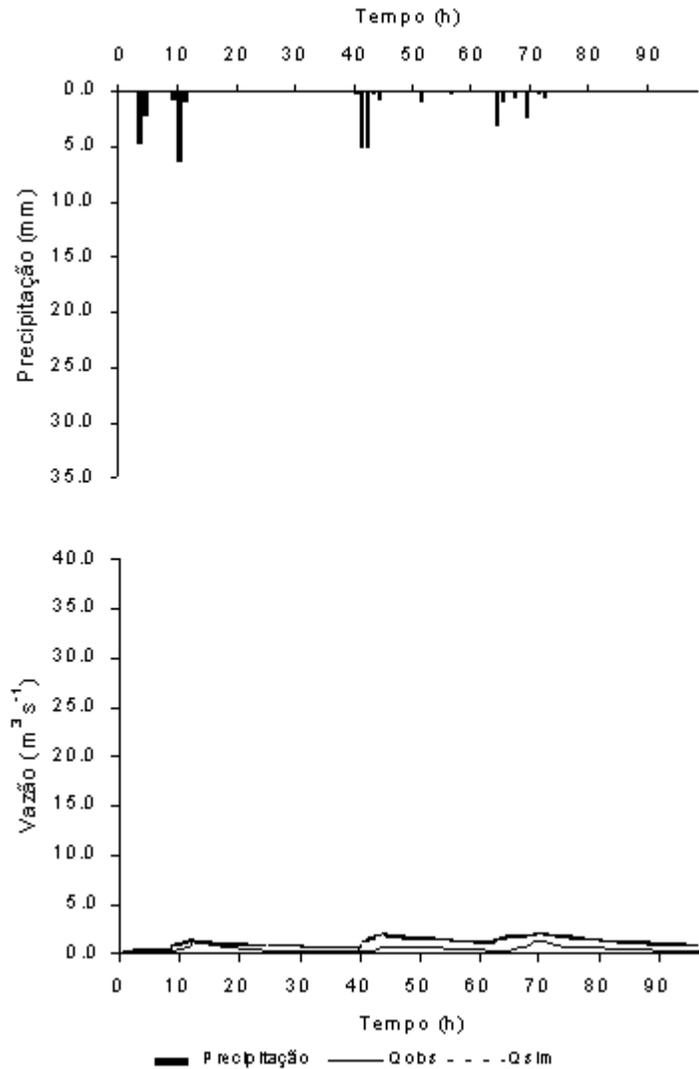


Figura 58 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação pela equação  $y = 0,0002P - 0,0012$ , utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 03 no período de 07 a 11/02/99 – 99 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP.

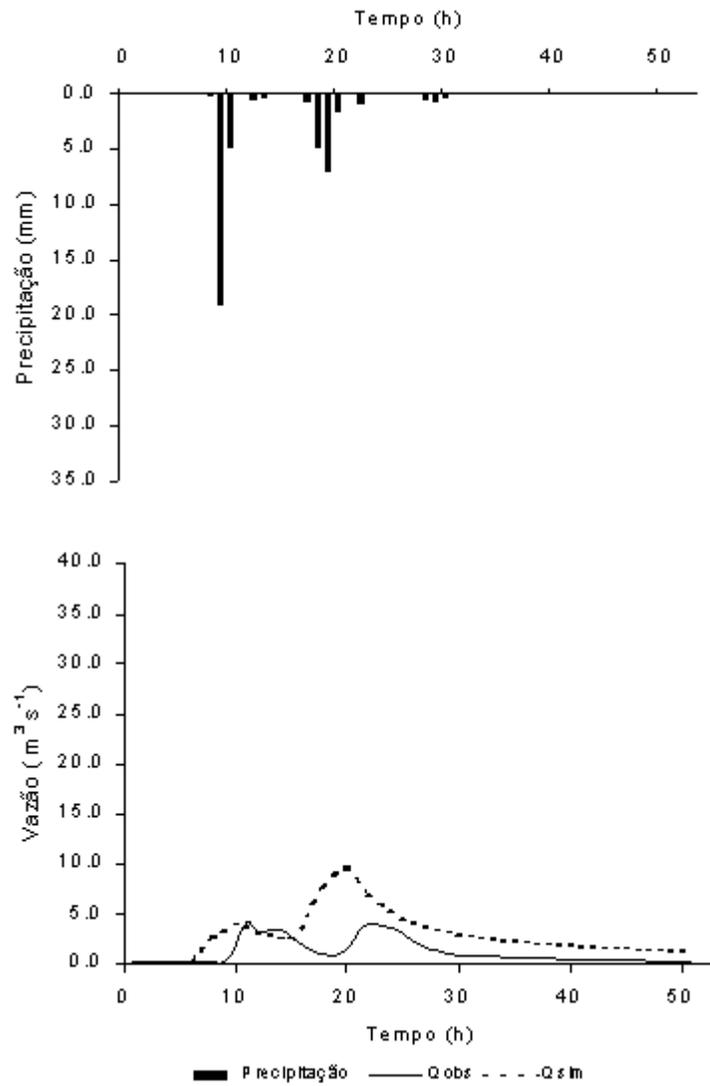


Figura 59 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação pela equação  $y = 0,0002P - 0,0012$ , utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 04 no período de 20 a 22/02/99 – 50 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP.

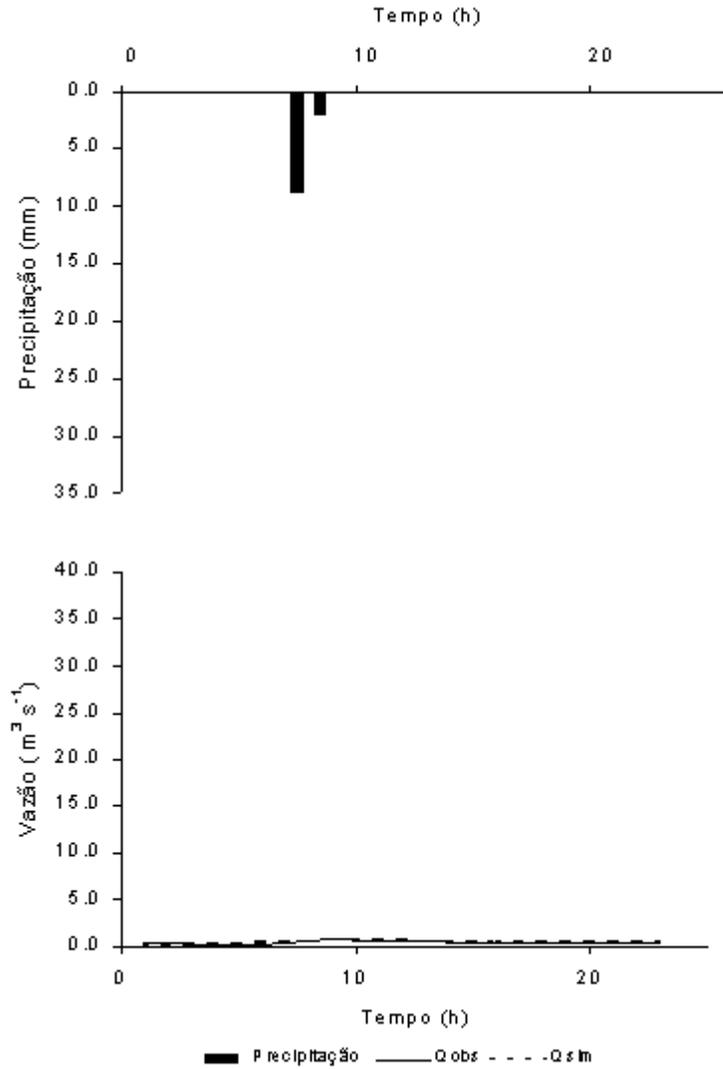


Figura 60 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação pela equação  $y = 0,0002P - 0,0012$ , utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 05 no período de 23 a 24/02/99 – 26 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP.

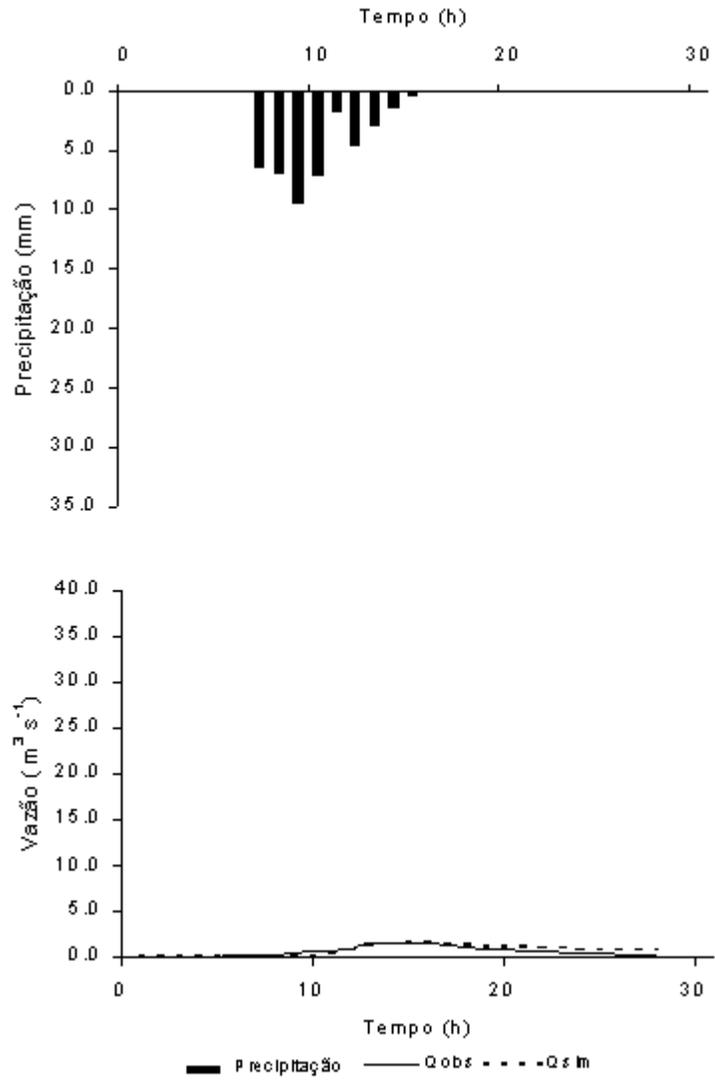


Figura 61 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação pela equação  $y = 0,0002P - 0,0012$ , utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 06 no período de 06 a 08/05/99 – 40 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP.

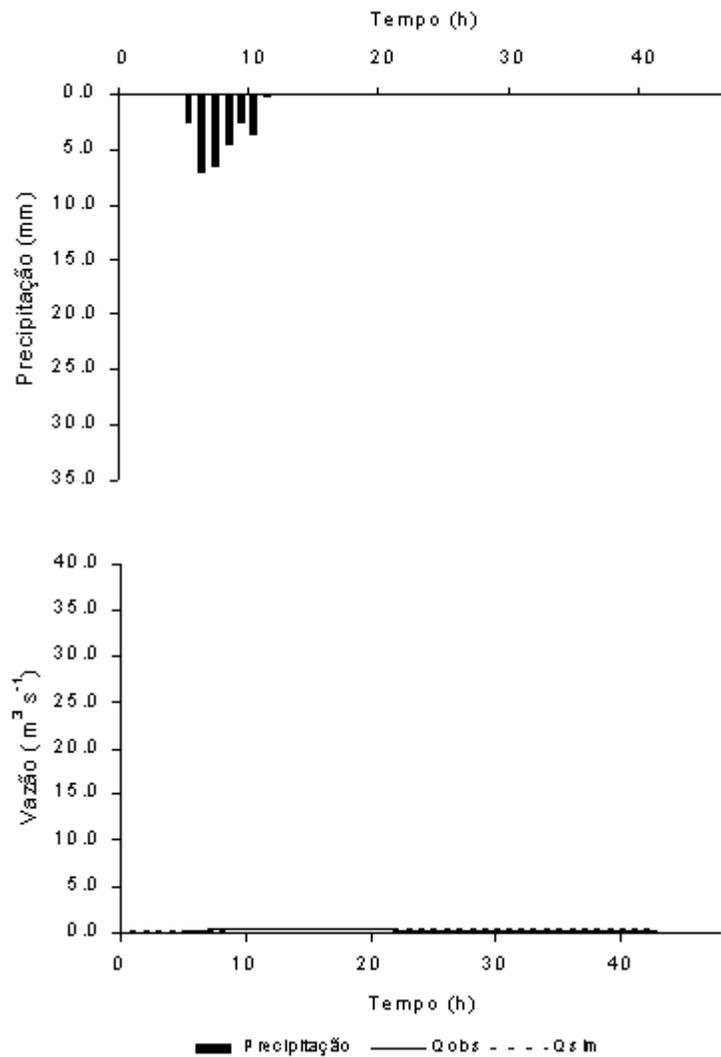


Figura 62 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação pela equação  $y = 0,0002P - 0,0012$ , utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 07 no período de 14 a 18/06/00 – 106 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP.

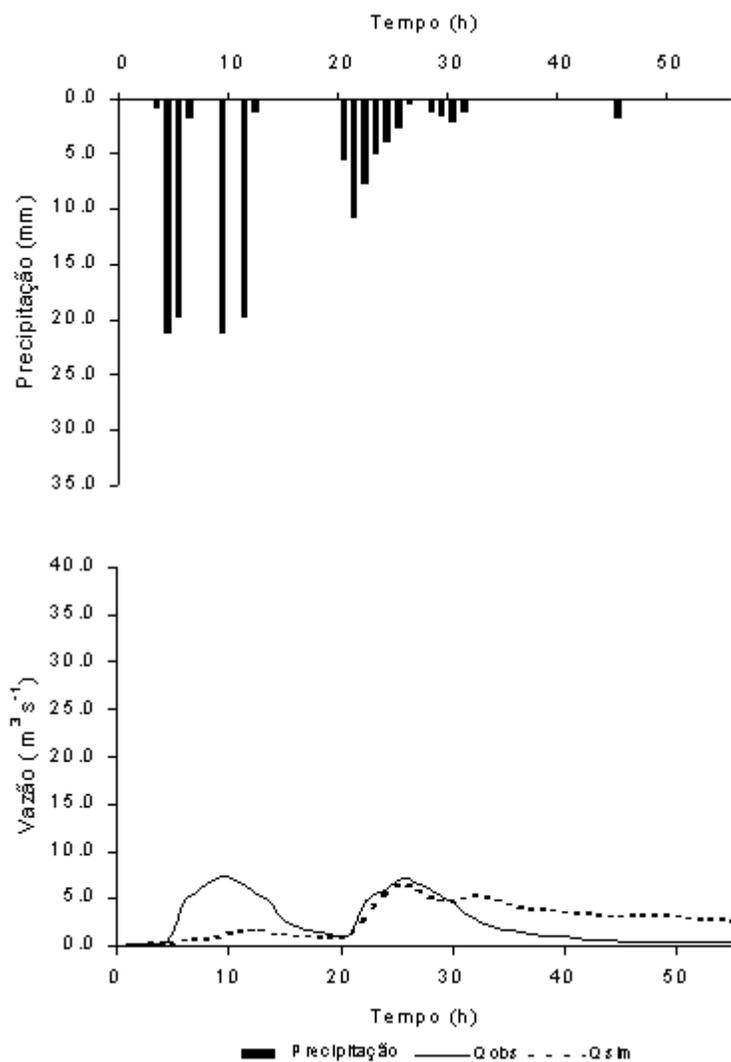


Figura 63 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação pela equação  $y = 0,0002P - 0,0012$ , utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 08 no período de 01 a 03/01/00 – 56 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP.

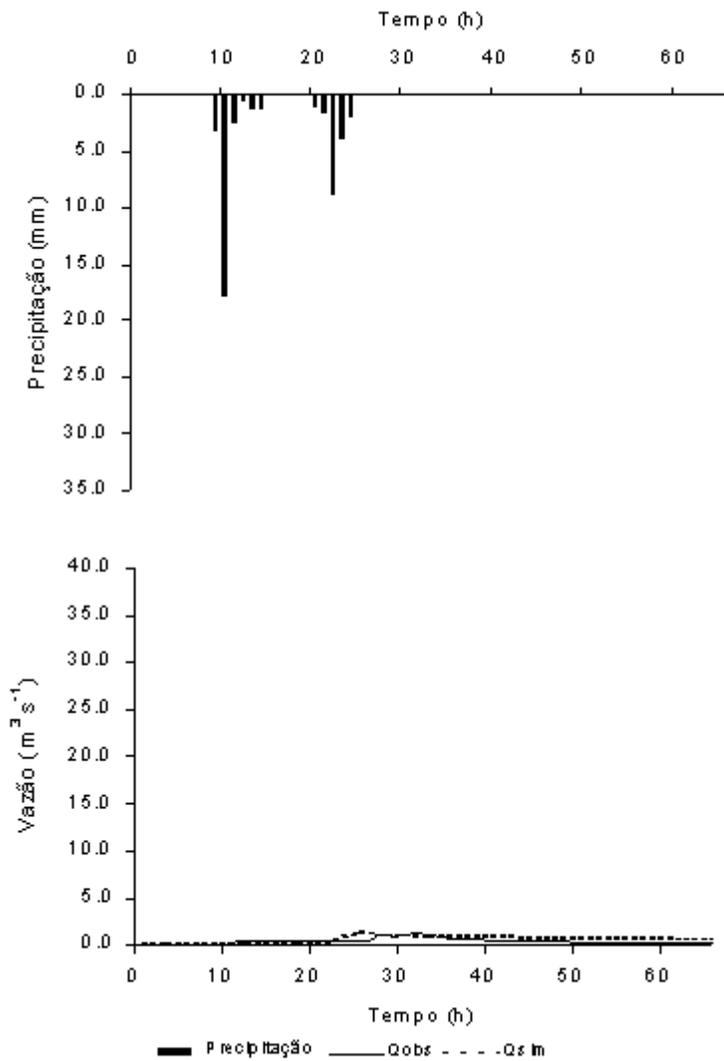


Figura 64 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação pela equação  $y = 0,0002P - 0,0012$ , utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 09 no período de 31/03 a 03/04/00 – 67 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP.

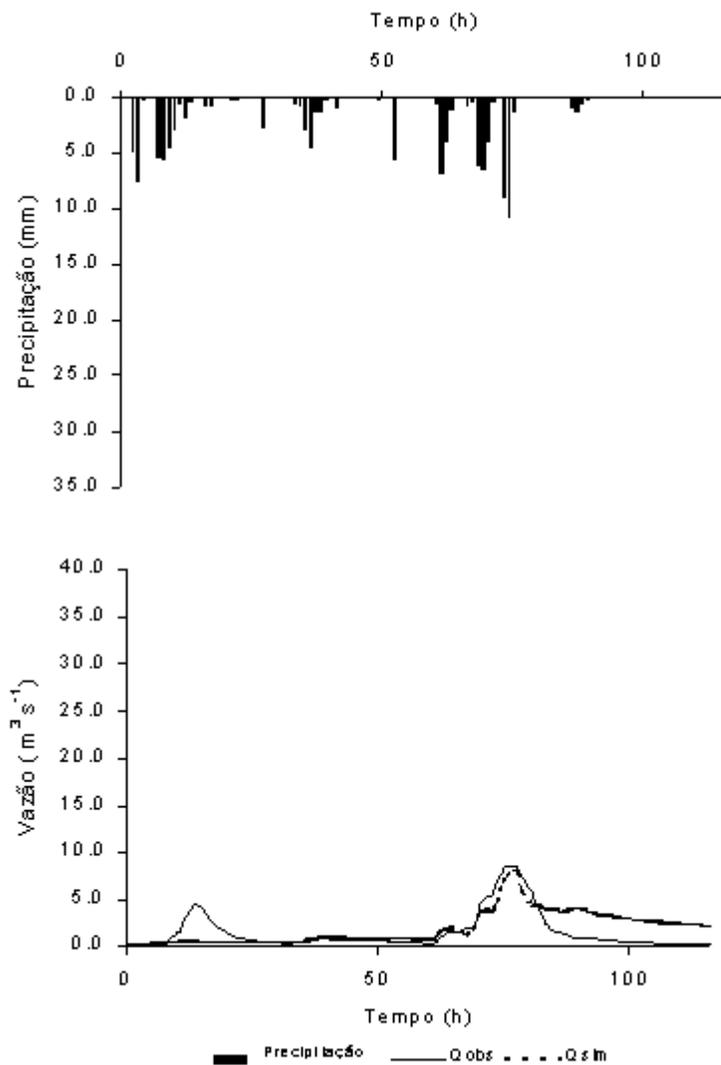


Figura 65 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação pela equação  $y = 0,0002P - 0,0012$ , utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 10 no período de 10 a 15/02/00 – 117 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP.

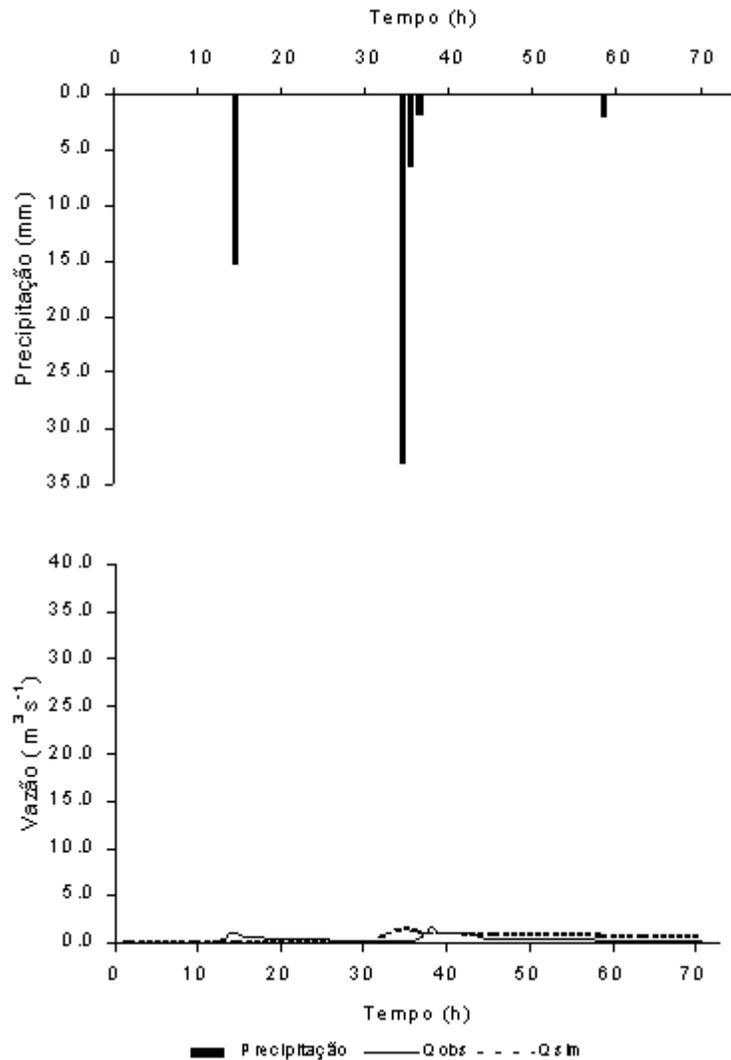


Figura 66 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação pela equação  $y = 0,0002P - 0,0012$ , utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 11 no período de 28/02 a 02/03/00 – 74 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP.

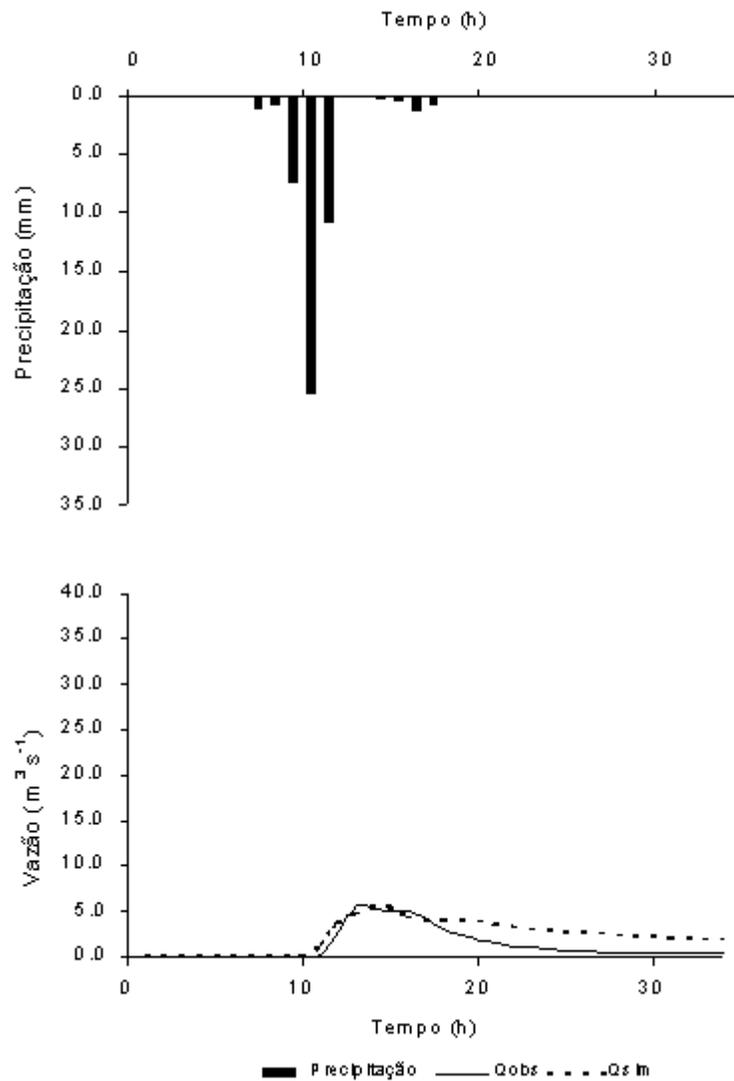


Figura 67 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação pela equação  $y = 0,0002P - 0,0012$ , utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 12 no período de 21 a 22/03/00 – 31 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP.

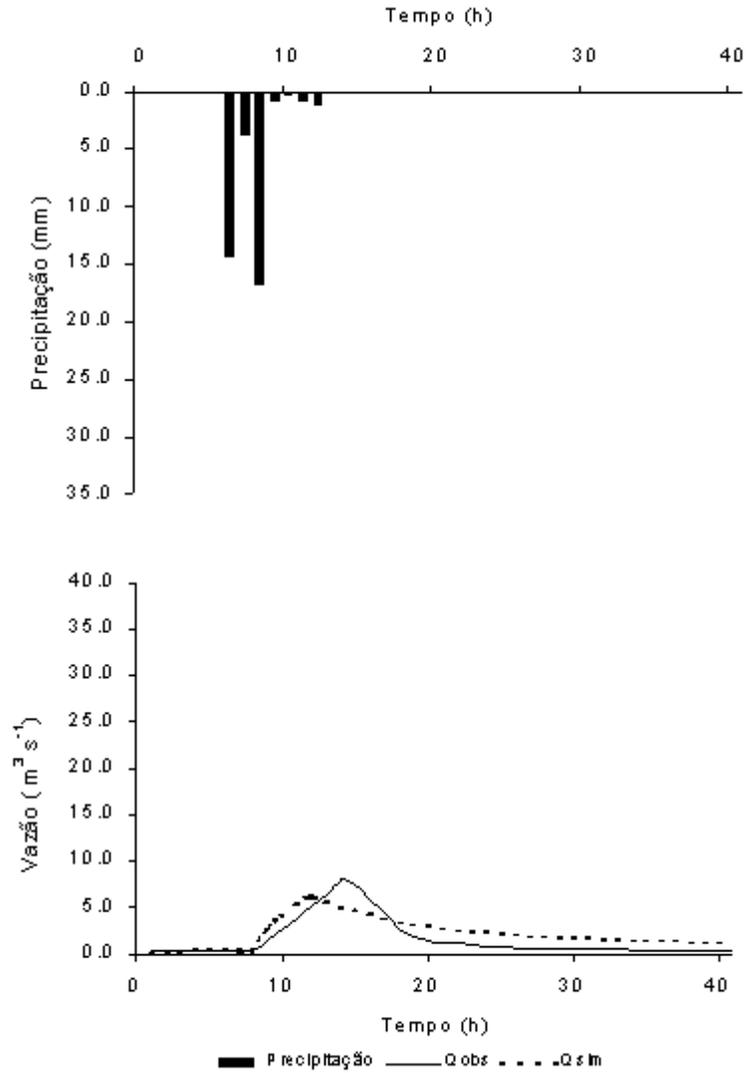


Figura 68 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação pela equação  $y = 0,0002P - 0,0012$ , utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 13 no período de 28 a 30/03/00 – 41 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP.

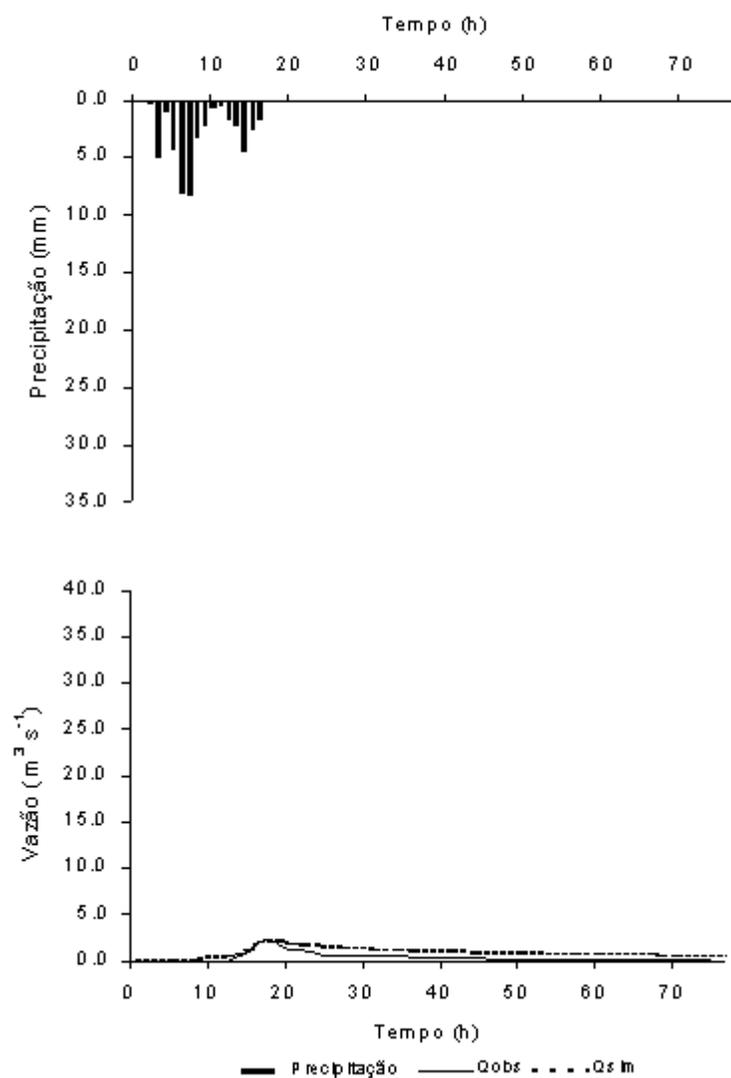


Figura 69 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação pela equação  $y = 0,0002P - 0,0012$ , utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 14 no período de 01 a 04/09/00 – 78 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP.

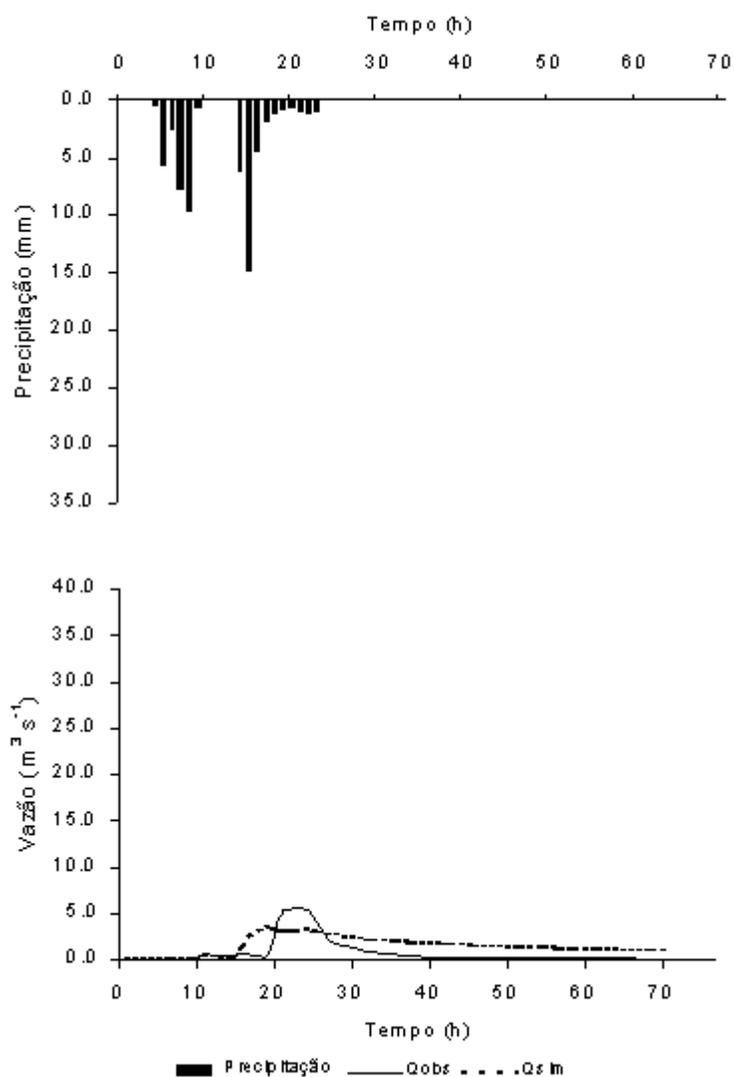


Figura 70 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação pela equação  $y = 0,0002P - 0,0012$ , utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 15 no período de 24 a 27/11/00 – 71 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP.

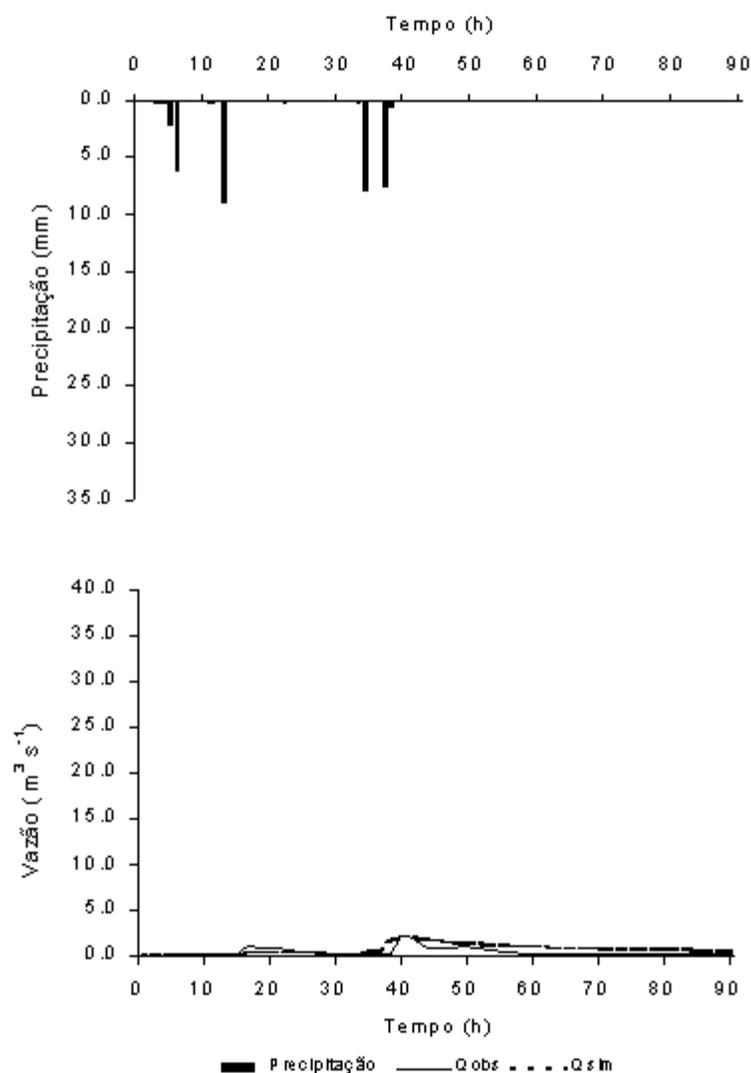


Figura 71 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação pela equação  $y = 0,0002P - 0,0012$ , utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 16 no período de 04 a 07/12/00 – 91 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP.

Na tabela 10 apresenta o conjunto de valores para os parâmetros armazenamento exponencial ( $m$ ), déficit de umidade inicial ( $SR_0$ ) e eficiência ( $E$ ) no processo de validação 2.

Tabela 10- Valores do armazenamento exponencial ( $m$ ), déficit inicial de umidade na zona das raízes ( $SR_o$ ) e a eficiência de Nash e Sucliffe ( $E$ )<sup>(1)</sup> para os eventos utilizados no processo de validação 2.

Evento	Período	Armazenamento exponencial (m)	$SR_o$ (mm)	$E$ <sup>(1)</sup>
1	05 a 07/01/99	0,01098	12,6	0,65
2	01 a 02/02/99	0,00148	7,0	0,80
3	07 a 11/02/99	0,00553	4,6	-5,06
4	20 a 22/02/99	0,00706	0,8	-3,17
5	23 a 24/02/99	0,00092	7,9	0,71
6	06 a 08/05/99	0,00285	29,9	0,62
7	14 a 18/06/99	0,00419	20,5	0,21
8	01 a 03/01/00	0,01896	28,1	-0,23
9	31/01 a 03/02/00	0,00633	12,5	-0,19
10	10 a 15/02/00	0,02041	0,2	0,36
11	28/02 a 02/03/00	0,00964	18,5	-1,28
12	21 a 22/03/00	0,00834	2,6	0,39
13	28 a 30/03/00	0,00614	12,0	0,58
14	01 a 04/09/00	0,00656	16,8	-0,28
15	24 a 27/11/00	0,01039	2,6	0,21
16	04 a 07/12/00	0,00616	3,9	-0,17

$$^{(1)} E = 1 - \frac{\text{Soma dos quadrados dos erros}}{(\text{Variância da vazão observada})^2}$$

Na tabela 10 pode-se verificar que este procedimento utilizado na validação de uma maneira geral proporcionou um melhor ajuste na simulação dos eventos. Os eventos 02, 06 e 13 permaneceram com eficiência superior a 50% como no procedimento 1. Os eventos 01 e 05 tiveram aumento na eficiência. No evento 15 foi observada uma diminuição na eficiência de 50% neste procedimento. Com relação aos valores de eficiência negativos observou-se que permaneceram nos mesmos eventos, porém com valores mais próximos de zero, indicando que ajuste na simulação melhor que na validação 1.

As Figuras 72 e 73 mostram a porcentagem de variação da vazão e volume na validação 2. A variação média da vazão foi de -1,5%, em módulo 19,9% (Figura 72). Os eventos 04, 07 e 15 (Figuras 59, 62 e 70) foram aqueles que apresentaram maior variação na vazão. Retirando-se estes eventos, a média ficou em 1,8% e em módulo 8,9%. A variação da vazão superior a 50% foi observada no evento 04.

A variação no volume foi de 1,8 a -125,8%, com a média de -50% (Figura 73). Os eventos 03 (Figura 58), evento 04 (Figura 59) e o evento 14 (Figura 69) apresentaram variação superior a 100%.

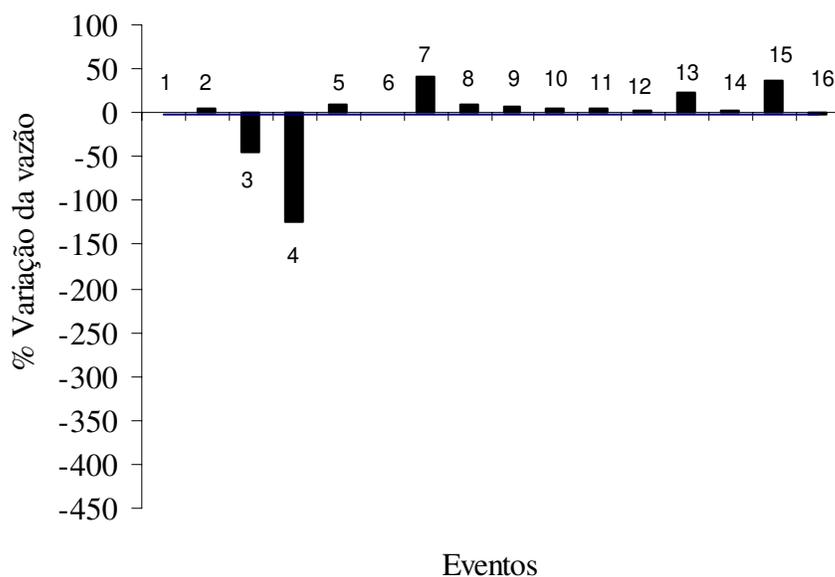


Figura 72 - Variação porcentual entre a vazão máxima observada e simulada para os eventos utilizados para a validação do modelo TOPMODEL, pela equação.

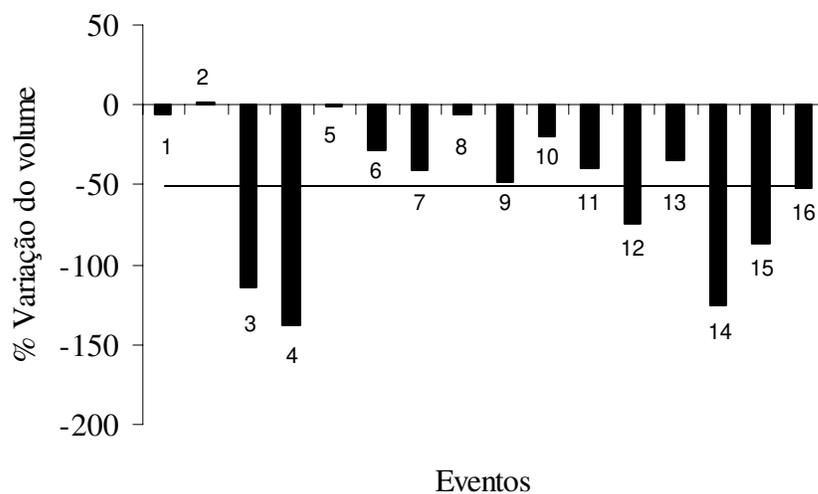


Figura 73 - Variação porcentual entre os volumes das hidrógrafas observada e simulada para os eventos utilizados na validação do modelo TOPMODEL, pela equação.

A dispersão entre os valores observados e simulados, processo de validação 2, para a vazão é mostrada na Figura 74. O ajuste entre os valores simulados e observados da vazão apresentou coeficiente de correlação ( $R^2$ ) de 0,54 significativo a 5%. A reta ajustada aos dados de vazão foi  $y = 0,7329x + 0,6239$ . Com relação aos resultados apresentados pela dispersão, observou-se uma tendência dos dados em subestimar os picos de vazão máxima.

A dispersão entre o volume observado e o simulado é apresentada na Figura 75. A reta de ajuste foi  $y = 1,0626x + 73851$ , com  $R^2$  de 0,84. Esta correlação foi superior ao processo de validação1. Os valores mostraram tendência a superestimar os volumes observados.

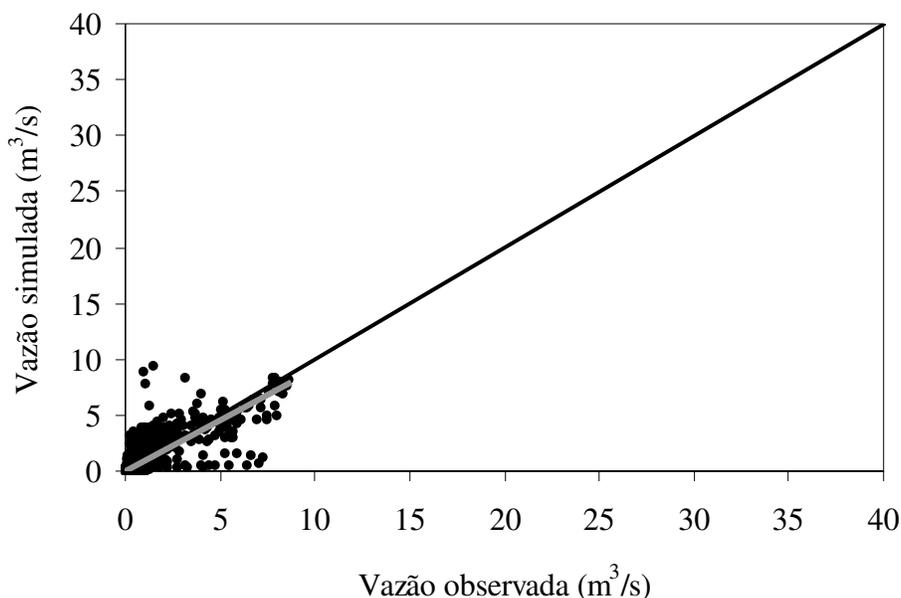


Figura 74 - Vazão observada versus simulada para os eventos na validação2 pelo modelo TOPMODEL na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho. Equação de ajuste  $y = 0,9126x$

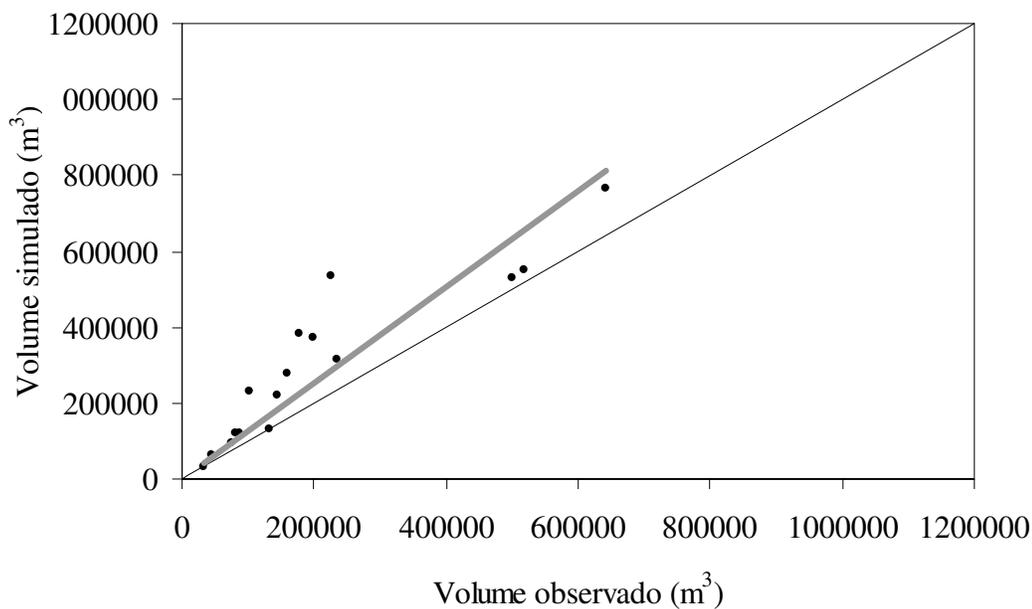


Figura 75 - Volume observado versus simulado para os eventos no processo de validação 2 pelo modelo TOPMODEL na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho. Equação de ajuste  $y = 1,268x$

As variações dos coeficientes de escoamento do processo de calibração e da validação 1 e 2 são apresentadas nas Figuras 76 e 77A e 77B, respectivamente.

A média de variação do coeficiente de escoamento apresentada pelos eventos foi de 27% para a simulação na calibração e de 44% para os dois processos de validação.

O evento 07 do processo de calibração apresentou variação do coeficiente de escoamento muito superior ao valor médio, na ordem de 1300% (Figura 76). Em 75% dos eventos a variação do coeficiente de escoamento foi inferior ao valor médio.

No processo de validação 1, os eventos 07 e 09 (Figura 78A) apresentaram maiores variações do coeficiente de escoamento com valores da ordem de 163% e 183%. Nesses eventos ocorreram 7 mm e 18 mm de chuva, portanto conforme RANZINI (2002), dificuldades no desempenho do modelo em função da precipitação ocorrida.

Os maiores valores de variação do coeficiente de escoamento no processo de validação 2 foi acusado nos eventos 03, 04 e 14 (Figura 78B). Os valores das variações nos coeficientes de escoamento determinados nesses eventos foram de -114%, -137%, e -125%, respectivamente. No evento 14 ocorreu chuva de 25 mm, enquanto que nos outros dois eventos foi inferior a 20 mm.

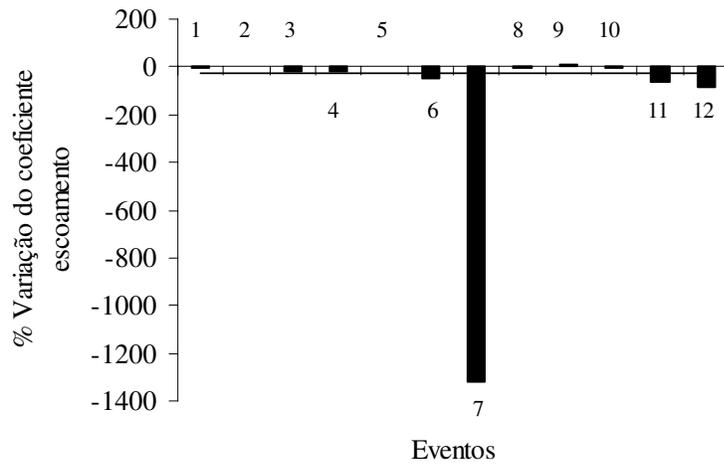


Figura 76 - Porcentagem de variação do coeficiente de escoamento dos eventos submetidos ao processo de calibração pelo modelo TOPMODEL na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho.

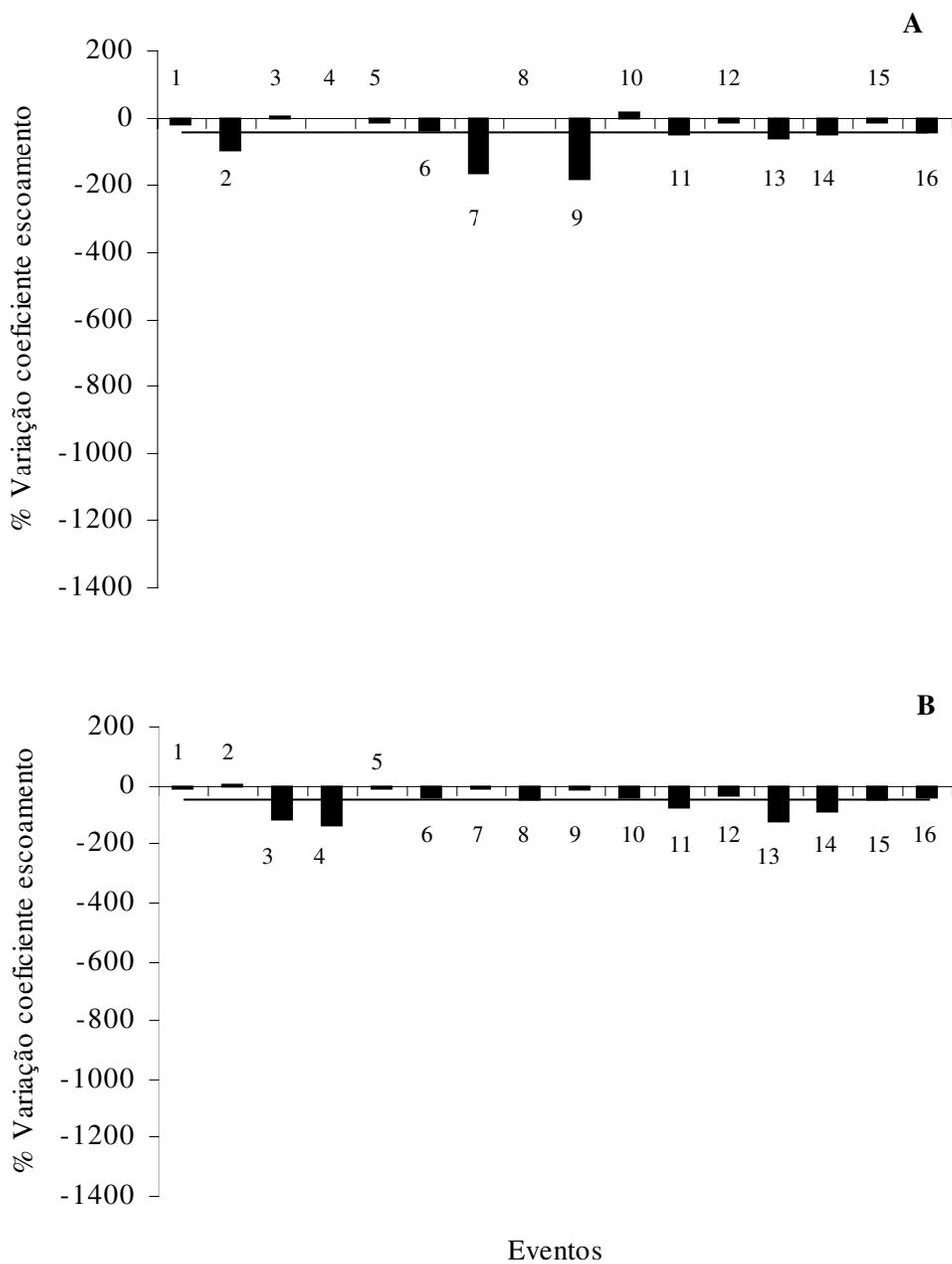


Figura 77 - Porcentagem de variação do coeficiente de escoamento dos eventos submetidos aos processos de validação 1 (A) e 2(B), pelo modelo TOPMODEL na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho.

Em todos os eventos simulados, tanto no processo de calibração quanto na validação pelas duas maneiras, verificou-se que ocorreu uma tendência do modelo em subestimar os valores de picos de vazão máxima e a superestimar em 25% dos eventos. Os menores valores subestimados para a vazão máxima de pico foram de 3% para o processo de calibração e a mesma porcentagem de 0,5% para as duas maneiras de validação.

Entre os dois processos utilizados, na validação, uma diferença foi observada na habilidade do modelo para simular os eventos. Mais de 60% dos eventos selecionados, no segundo procedimento de validação, apresentaram melhores resultados no processo de simulação em relação ao primeiro. Para o primeiro processo de validação os valores de pico de vazão entre 4 a 6 m<sup>3</sup>/s foram os que apresentaram uma menor porcentagem de variação entre as vazões. Na segunda maneira de validar os eventos, verificou-se que as maiores variações de vazão ocorreram para os menores valores de vazão máxima de pico. No evento 04 foi verificado este fato, que apresentou vazão máxima de pico de 4 m<sup>3</sup>/s.

## 6. CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos nesse trabalho, pode-se concluir que:

- a bacia do Ribeirão dos Marins seção Monjolinho é uma região agrícola, cuja cultura de cana-de-açúcar ocupa 52% da área. A mata ciliar representa 6,3% da área da bacia. Nos argissolos da bacia encontra-se 32% da cultura de cana-de-açúcar, 4% de pastagens, 2,3% de mata ciliar e 1% de área urbana. Na faixa de declividade de 6 a 20% representa 65% dos terrenos da bacia, as declividades acima de 40% estão presentes em 3 ha. O padrão de ocupação dessa bacia é diferente da superfície total da bacia, dessa maneira, os resultados encontrados na região da seção Monjolinho não poderão ser diretamente expandidos para a bacia como um todo;
- a caracterização hidrológica da bacia revelou que os meses mais chuvosos do ano de 1999 e 2000 não ultrapassaram 29% do total de chuva anual. Nos meses de maior precipitação os valores de vazão mensal foram superiores a 4 m<sup>3</sup>/s. Enquanto, nos meses de menor precipitação as vazões média mensais não superaram o valor de 1,2 m<sup>3</sup>/s. Essas características da bacia auxiliaram na escolha dos eventos para simulação do processo de calibração e validação;
- a resolução espacial do modelo numérico do terreno influencia no controle de distribuição do índice topográfico. A importância da distribuição do índice topográfico, está na representação das áreas potenciais de geração de escoamento. Nesse estudo, verificou-se que a definição da resolução deve ser realizada em função da dimensão espacial da área superficial, do tamanho de célula e da precisão da informação existente, para melhor representar a bacia no processo de simulação. Na resolução espacial de 70x70 m foi adotada para a simulação do modelo TOPMODEL, nessa condição, o valor máximo do índice topográfico encontrado na bacia foi de 14,4 e o mínimo de 5,2.
- o estudo mostrou que em função resolução a ser adotada deverá ocorrer uma re-otimização dos parâmetros utilizados na simulação.
- os grupos de eventos utilizados no processo de calibração apresentaram simulações bem distintas. Nos Grupo 1 e 2, verificou-se um bom desempenho do modelo na simulação das vazões máximas, mas com uma tendência a subestimar esses valores. No Grupo 3, as simulações para eventos de chuva menores que 20 mm, apresentaram uma qualidade

inferior dos grupos anteriores. Os resultados do processo de simulação para a condição de chuva do grupo 3 foram verificados por outros autores;

- a simulação dos volumes escoados no processo de calibração apresentaram uma tendência a superestimar os valores observados;
- o processo de validação 1 observa-se, que em 30% dos eventos, eficiência superior a 50%. Apenas 18% dos eventos apresentaram variação de vazão máxima observada e simulada superior à média das variações. Uma tendência de superestimar os valores de vazão máxima foi observada na maioria dos eventos. Um percentual de 25% dos eventos apresentaram variação do volume escoado observado e simulado superior a 50%;
- o processo de validação 2 verificou-se, que 56% dos eventos, a variação da vazão máxima observada e simulada foi inferior a 20%. A vazão máxima foi superestimada em 12% dos eventos. Os valores do volume escoado simulado foram superestimados em 87% dos eventos. Um percentual 95% dos eventos apresentaram variação da vazão máxima observada e simulada inferior a 50%. Apenas 30% dos eventos apresentaram variação do volume simulado e observado superior ao valor médio da variação dos eventos;
- a relação entre a precipitação e o armazenamento exponencial ( $m$ ), mostrou-se promissora na simulação do modelo para a bacia. Esse procedimento pode indicar futuros estudos na busca de relações dos parâmetros com a precipitação ou outras variáveis climáticas.
- os eventos com valores de chuva menores que 20 mm apresentaram simulação com menor eficiência; semelhante aos resultados encontrados por RANZINI (2002);
- os resultados apresentados na simulação considerando a simulação da vazão da máxima, os volumes escoados e dos coeficientes de escoamento demonstraram que o modelo TOPMODEL pode ser aplicado para bacias agrícolas com área de drenagem em torno de 20km<sup>2</sup>;

Diversos autores aplicaram com o modelo TOPMODEL, como SCHULER (1998), RANZINI (2002) e COELHO (2003), entre outros, realizaram estudos considerando a calibração isolada para cada evento, portanto, os valores dos parâmetros encontrados do modelo para as bacia não pode ser generalizado. Nesse estudo procurou-se definir um grupo de parâmetros que fossem representativos para a bacia dos Ribeirão dos Marins seção Monjolinho. Futuras investigações devem ser realizadas para se verificar a potencialidade do

modelo TOPMODEL ser aplicado na escala regional para simulação de eventos, isto é, a busca de valores representativos regionais dos parâmetros do modelo.

## **7. APÊNDICES**

**Apêndice A: Velocidade de propagação no canal (*CHV*)**

## Estimativa da Velocidade de propagação no canal – channel velocity (CHV)

No cálculo da velocidade de propagação no canal foi considerado o instante da resposta em que chuva intensa passa a contribuir na saída da seção Monjolinho. Nesta seção foram instalados dois pluviógrafos sendo na região de cabeceira (D4 -118R) e outro na saída (D4 - 116R). Os cálculos foram baseados na resposta da chuva intensa ocorrida somente na cabeceira, captada pelo pluviógrafo D4 – 118R, portanto sem registro no pluviógrafo D4 – 116R. Outras considerações, no cálculo da velocidade de propagação do canal, foram as ocorrências de chuvas com valores superiores a 10% àquelas ocorridas na saída registradas pelo pluviógrafo D4 – 116R. E, também, eventos que apresentavam o mesmo intervalo de tempo para o caminhamento da onda de cheia Figura 1. Foram escolhidos cinco eventos que apresentavam estas características para efetuar a estimativa da velocidade de propagação no canal. Três eventos utilizados no cálculo da velocidade de propagação no canal são mostrados como exemplos na Figura 2. Foi observado pelos dados que o intervalo de tempo, para a propagação da onda de cheia até a saída da seção Monjolinho, era de quatro horas. Figura 1 – Ilustração do tempo de concentração da velocidade de propagação da onda

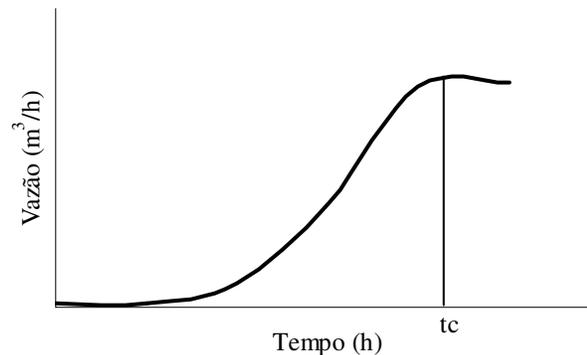


Figura 1 - Ilustração do cálculo do tempo de concentração adotado para a estimativa da velocidade de propagação da onda

A velocidade de propagação no canal foi calculada através da seguinte equação:

$$v = \frac{d}{t} \quad (1)$$

Sendo:  $v$  a velocidade de caminamento da onda decorrente da chuva ocorrida na cabeceira da seção até a seção de drenagem (exutório), (m/s);

$d$ , o comprimento do canal principal da bacia (m),  $t$ , o tempo necessário para provocar onda de cheia no exutório pela precipitação ocorrida na cabeceira da bacia (s).

Exemplo de cálculo da velocidade de propagação da onda: 
$$v = \frac{8,975 * 10^3}{4 * 3600} = 0,623 m / s$$

Na figura 2, estão representados os exemplos de alguns eventos escolhidos para o cálculo da velocidade de propagação da onda na seção Monjolinho.

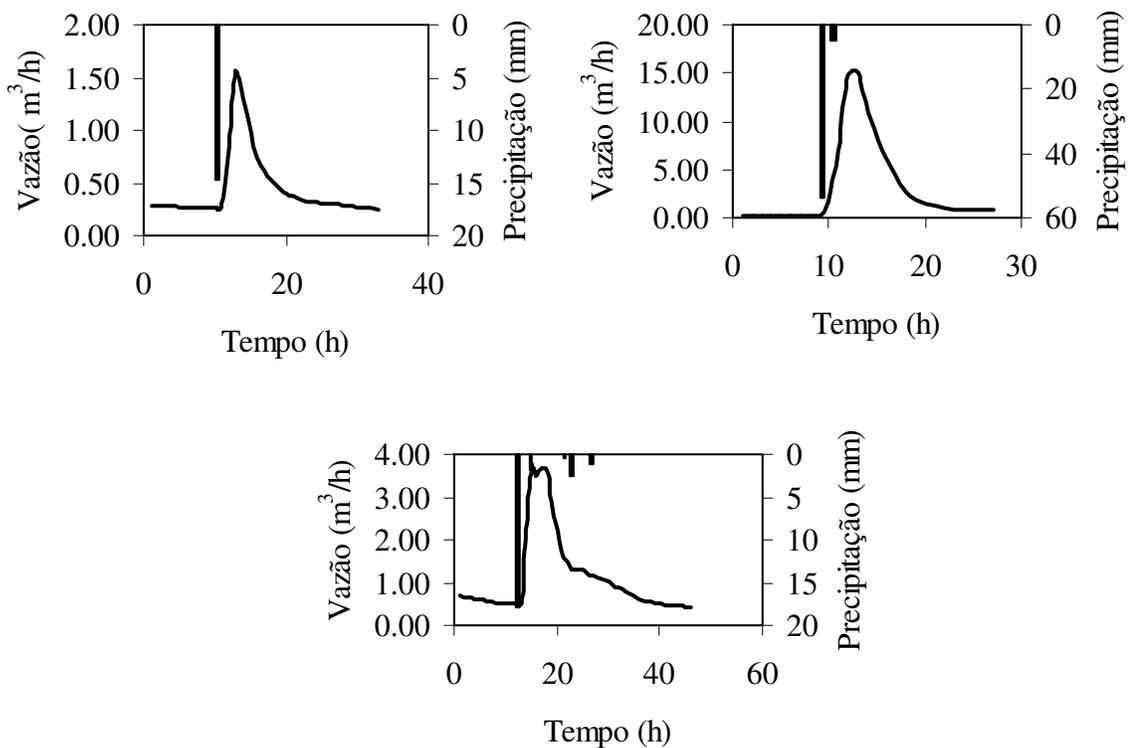


Figura 2 – Gráficos representando três eventos escolhidos para cálculo da CHV

## **Apêndice B: Hidrogramas de simulação no processo de calibração**

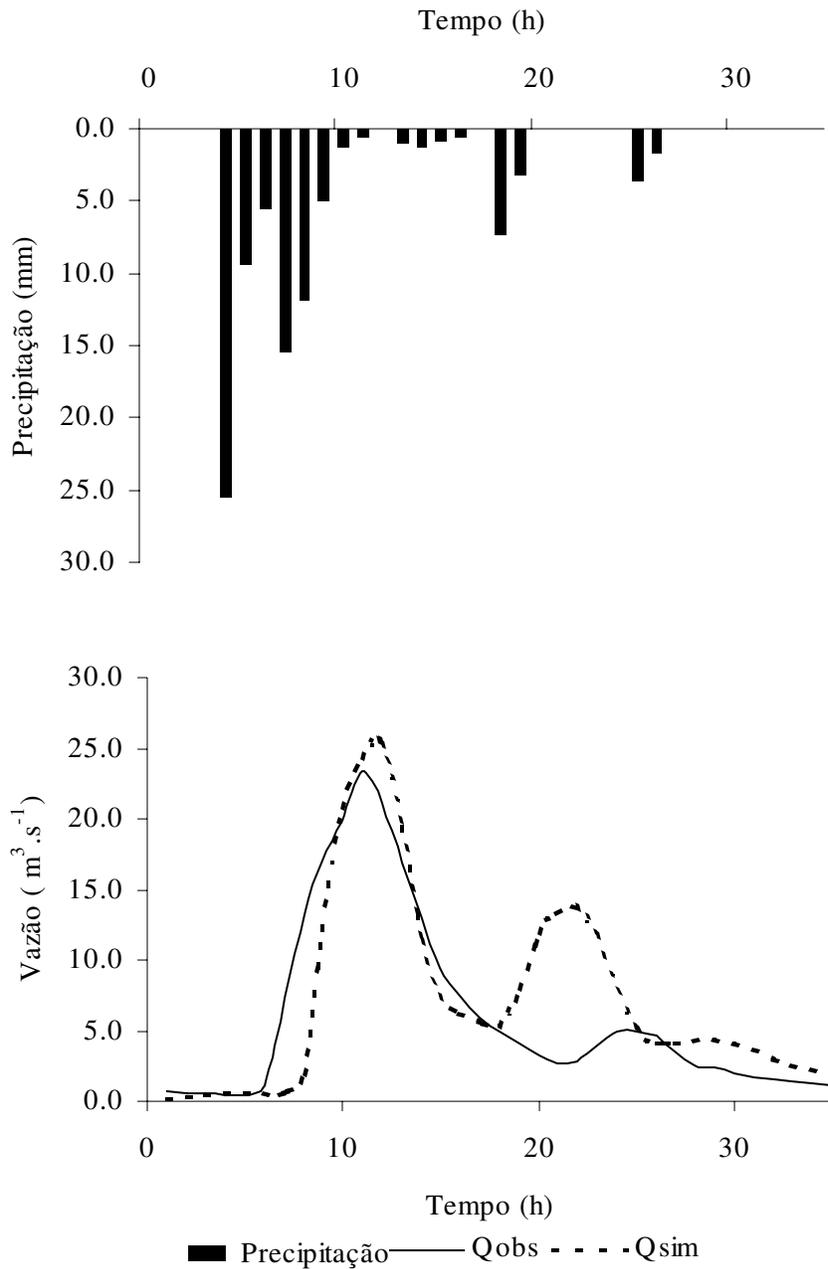


Figura B1 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de calibração utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 04 no período de 14 a 16/01/99 – 35 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho– Piracicaba – SP.

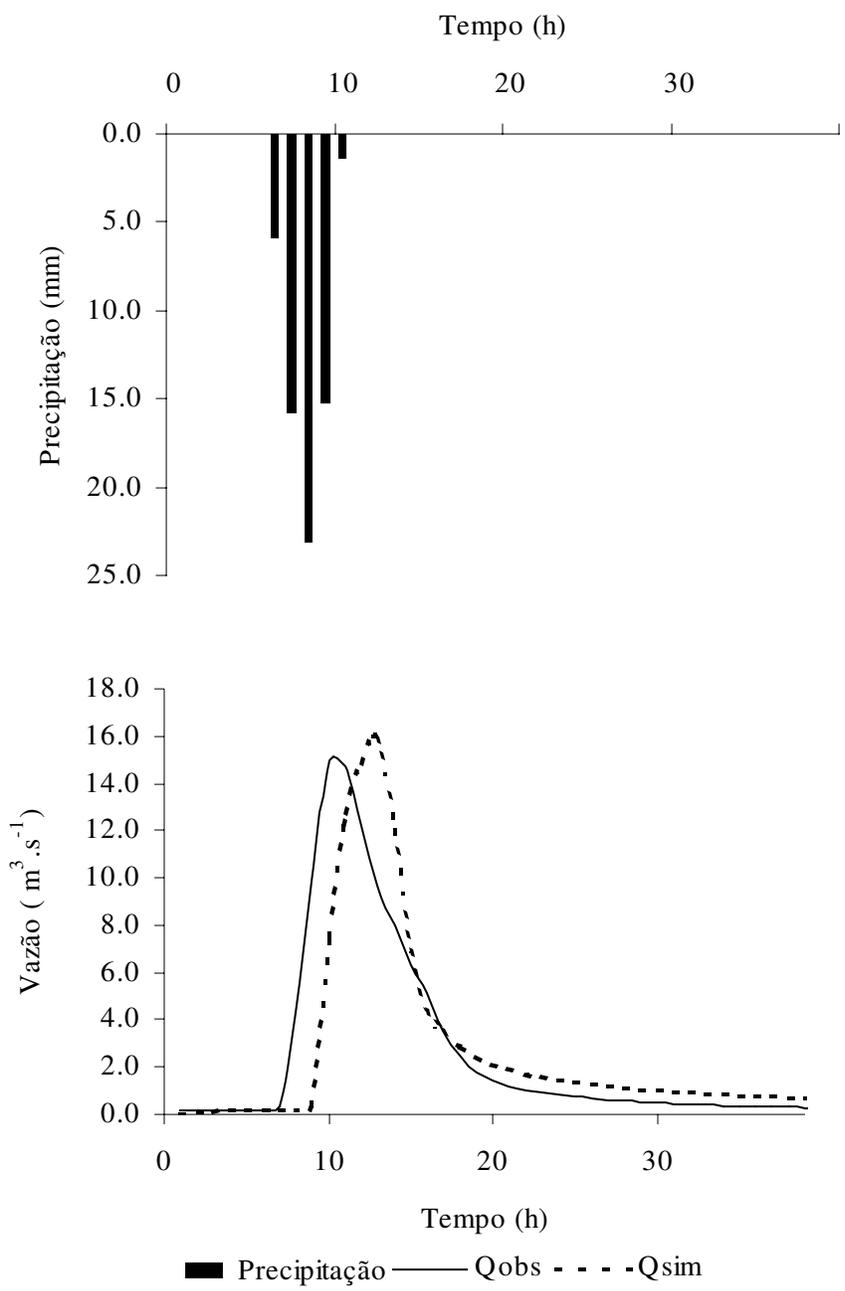


Figura B2 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de calibração utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 09 no período de 07 a 09/01/00 – 40 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006, monitorado pelo CTH/DAEE, bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP.

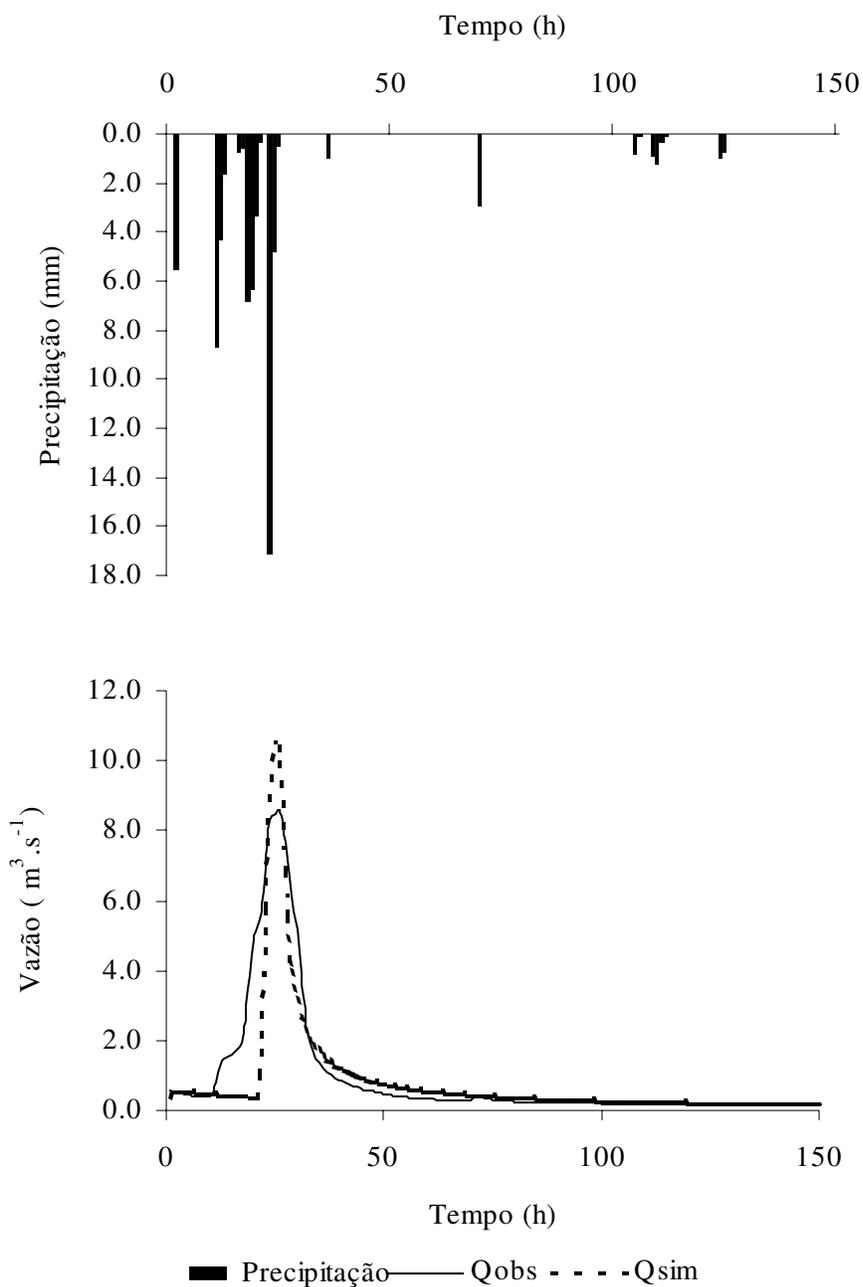


Figura B3 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de calibração utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 10 no período de 12 a 19/02/00 – 167 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE, bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP.

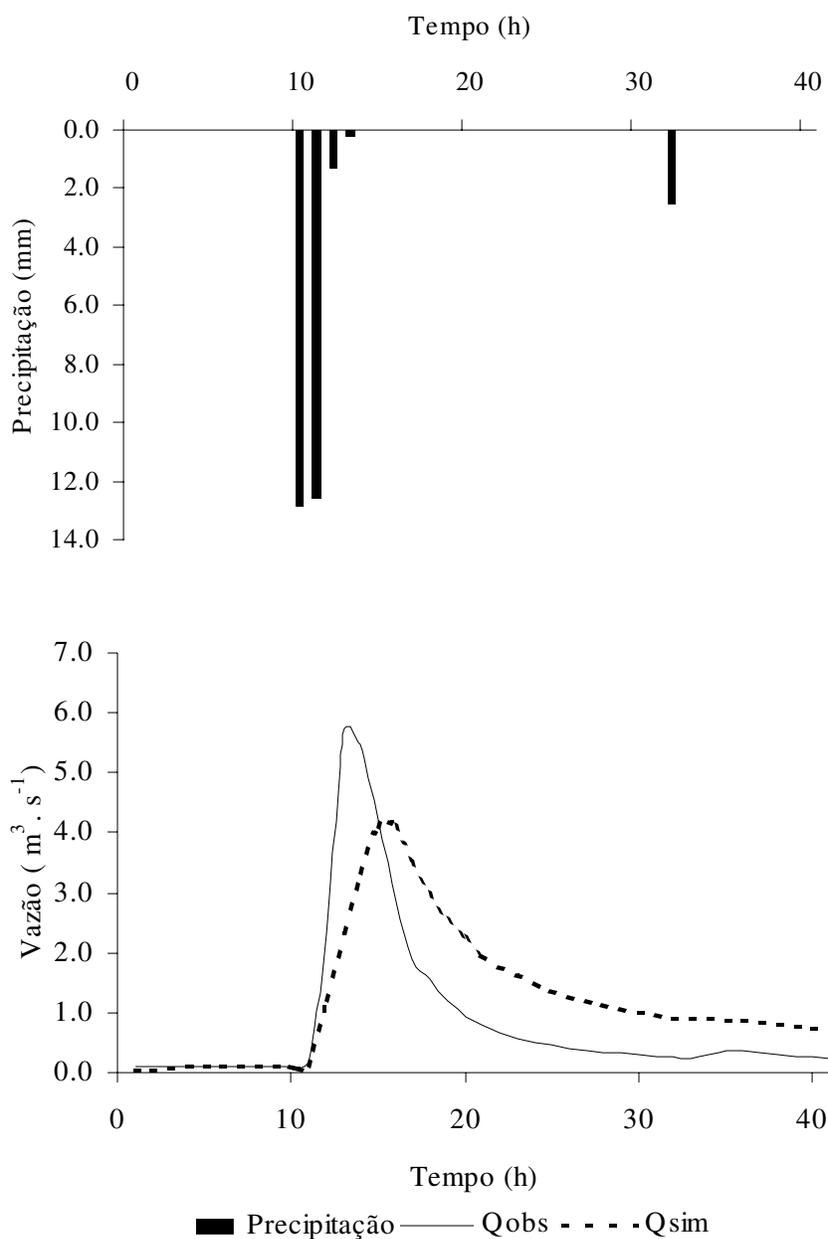


Figura B4 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de calibração utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 01 no período de 03 a 05/01/99 – 41 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE, bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP.

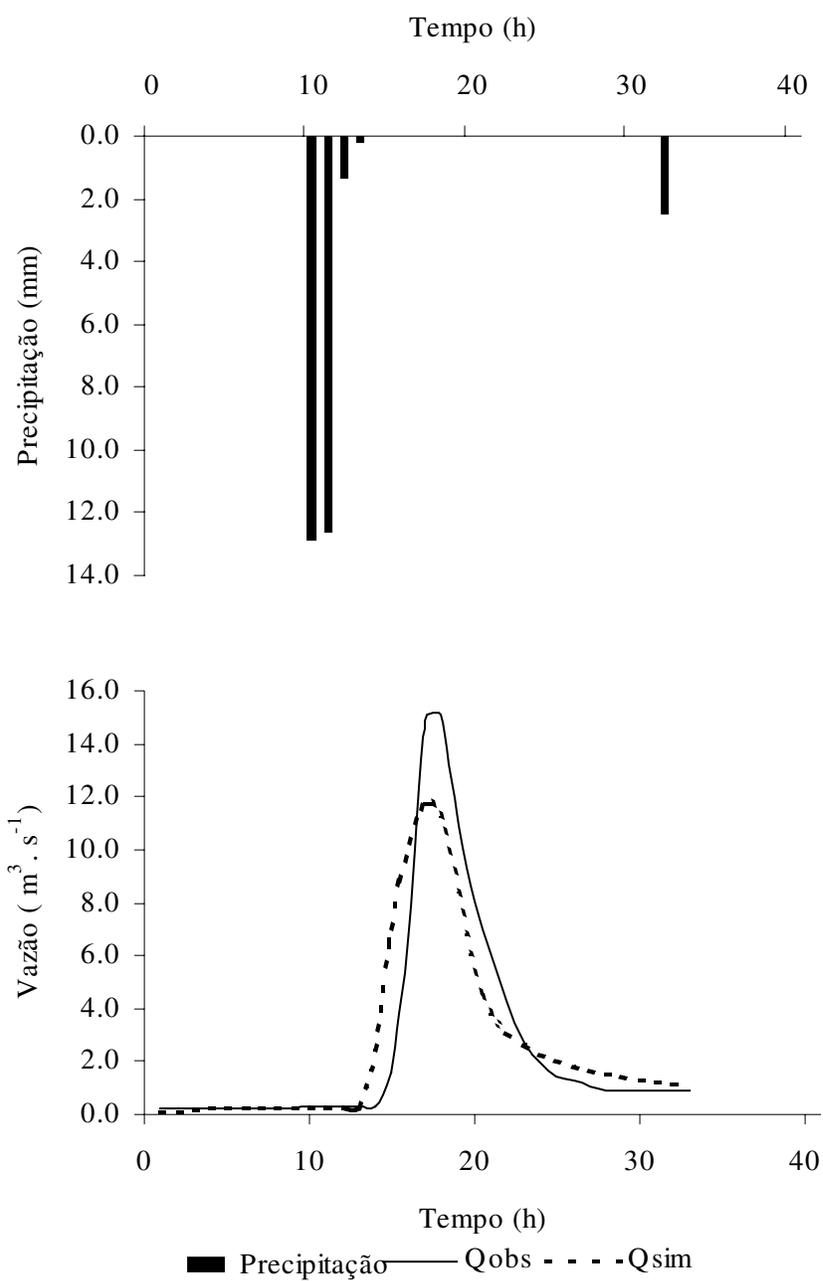


Figura B5 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de calibração utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 03 no período de 13 a 14/01/99 – 35 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE, bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP.

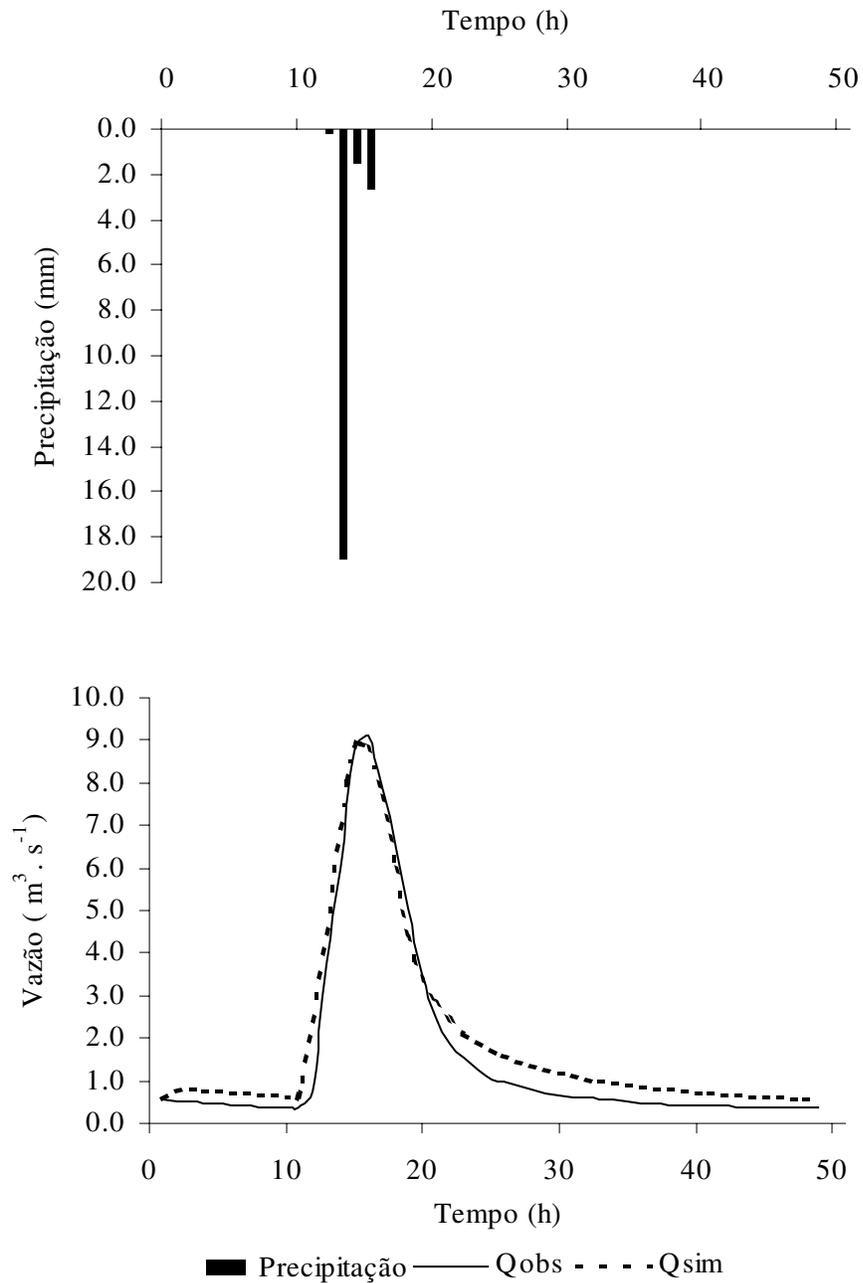


Figura B6 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de calibração utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 05 no período de 02 a 04/02/99 – 51 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE, bacia do Ribeirão Marins seção Monjolinho – Piracicaba – SP.

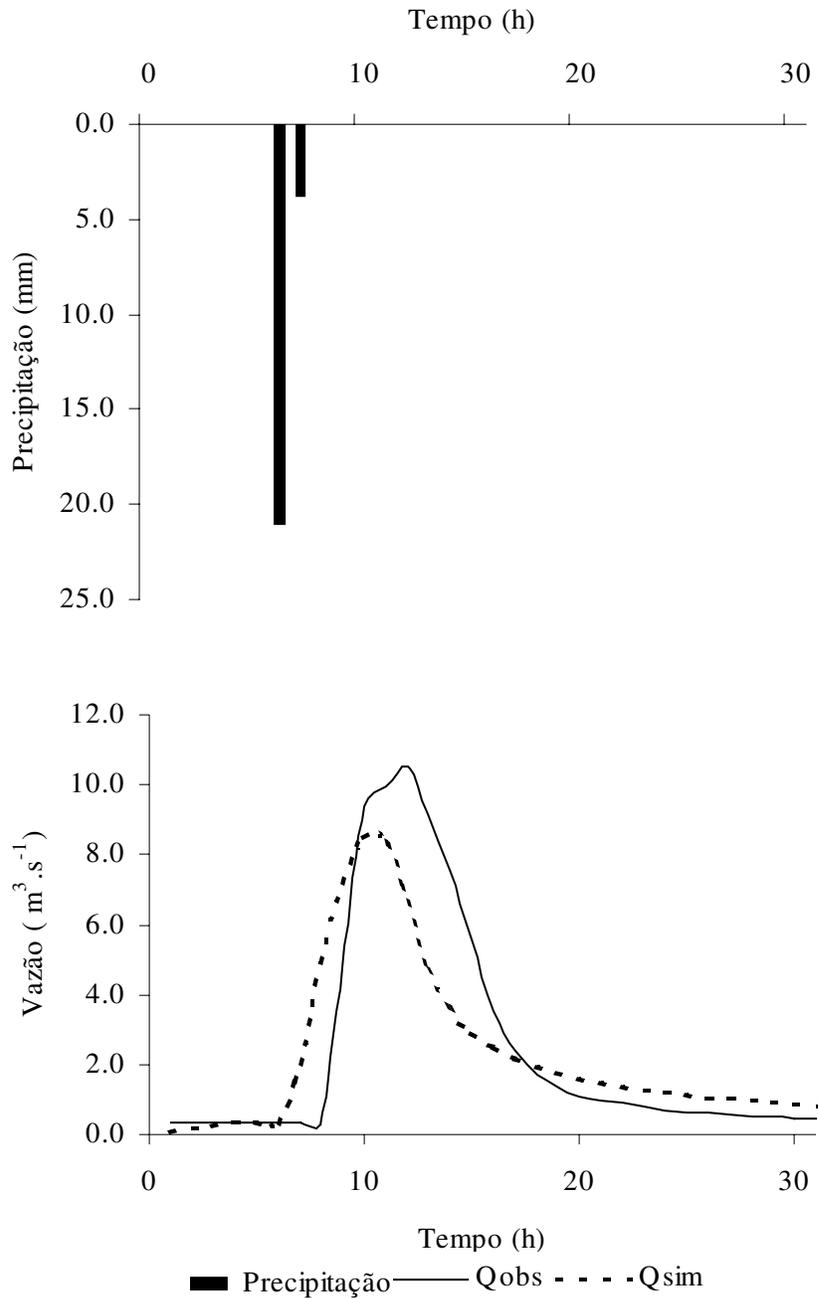


Figura B7 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de calibração utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 06 no período de 11 a 12/02/99 – 31 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE, bacia do Ribeirão Marins seção Monjolinho – Piracicaba – SP.

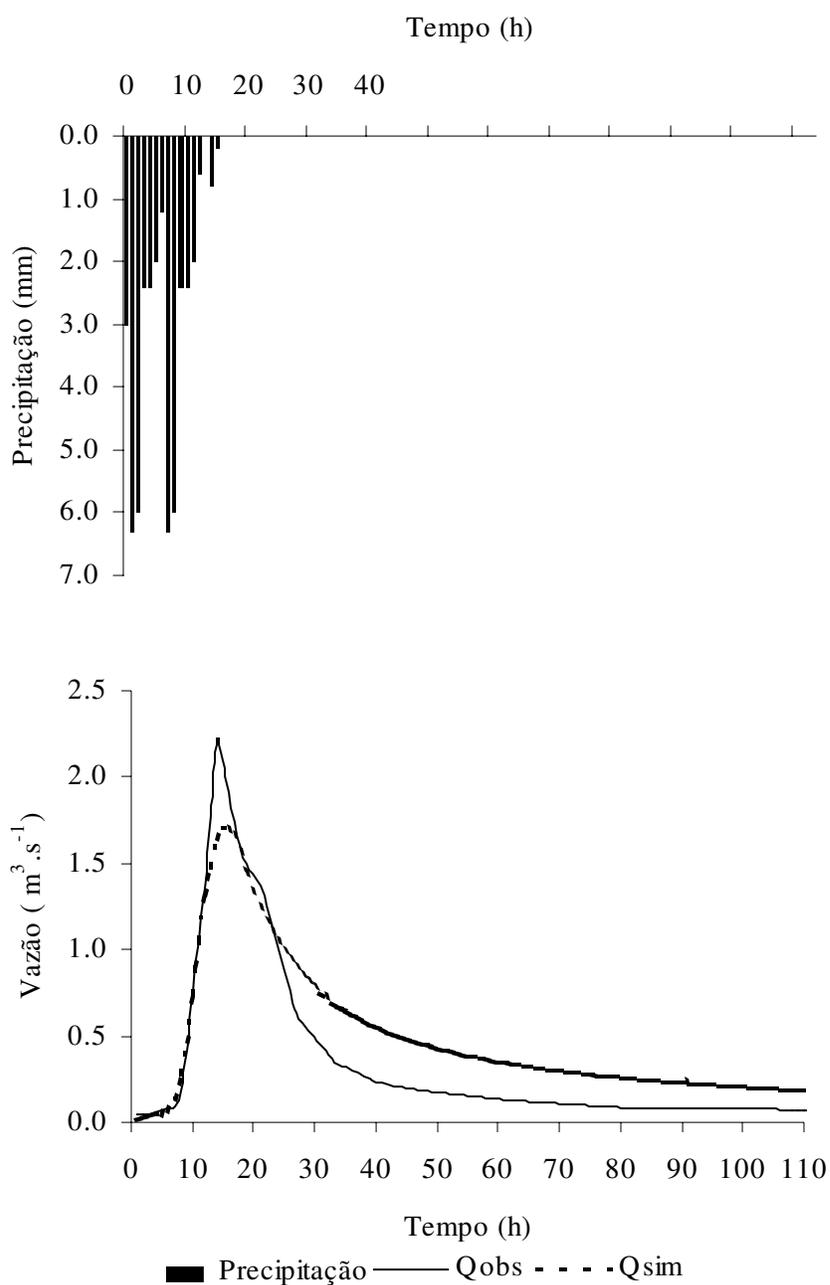


Figura B8 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de calibração utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 08 no período de 20 a 24/06/99 – 114 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE, bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP.

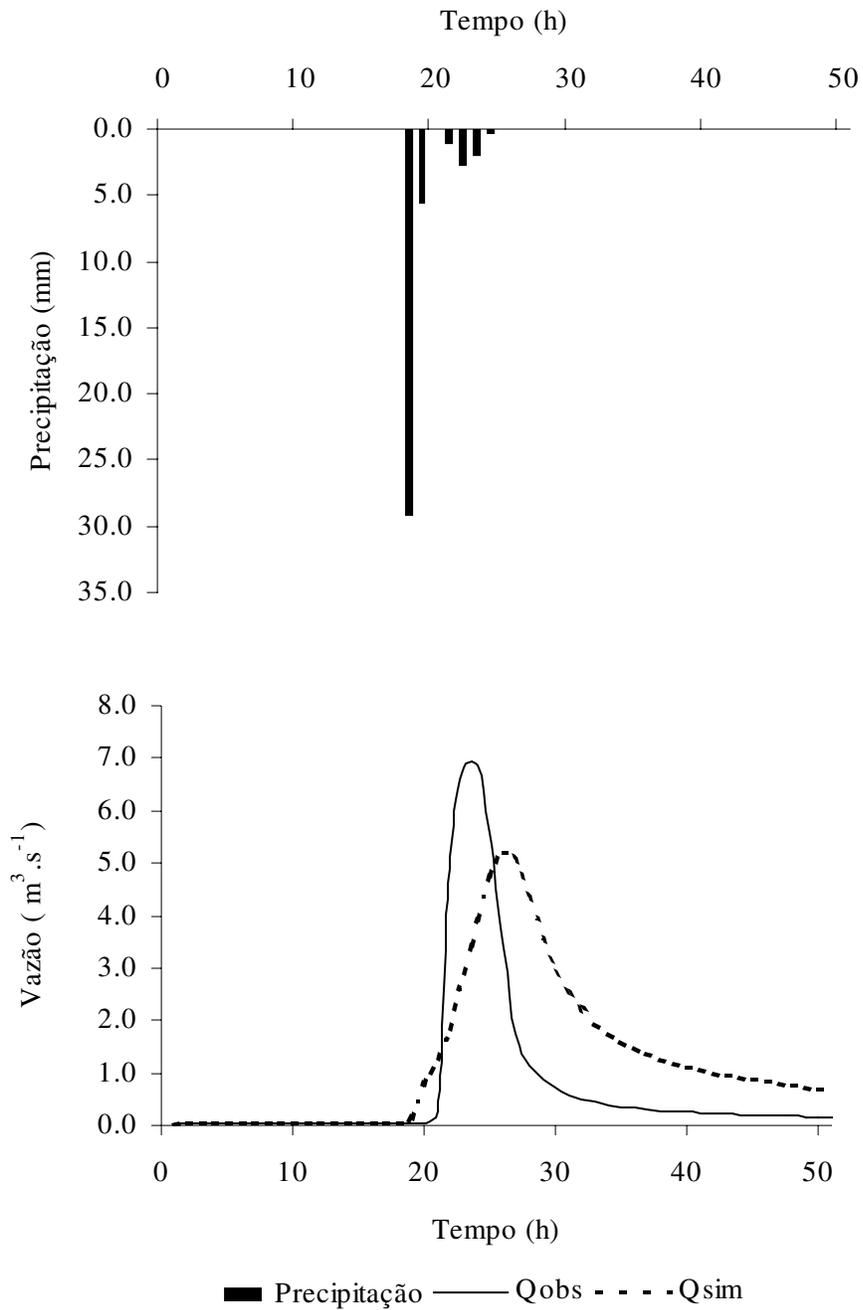


Figura B9 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de calibração utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 12 no período de 14 a 16/09/00 – 51 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na seção Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP.

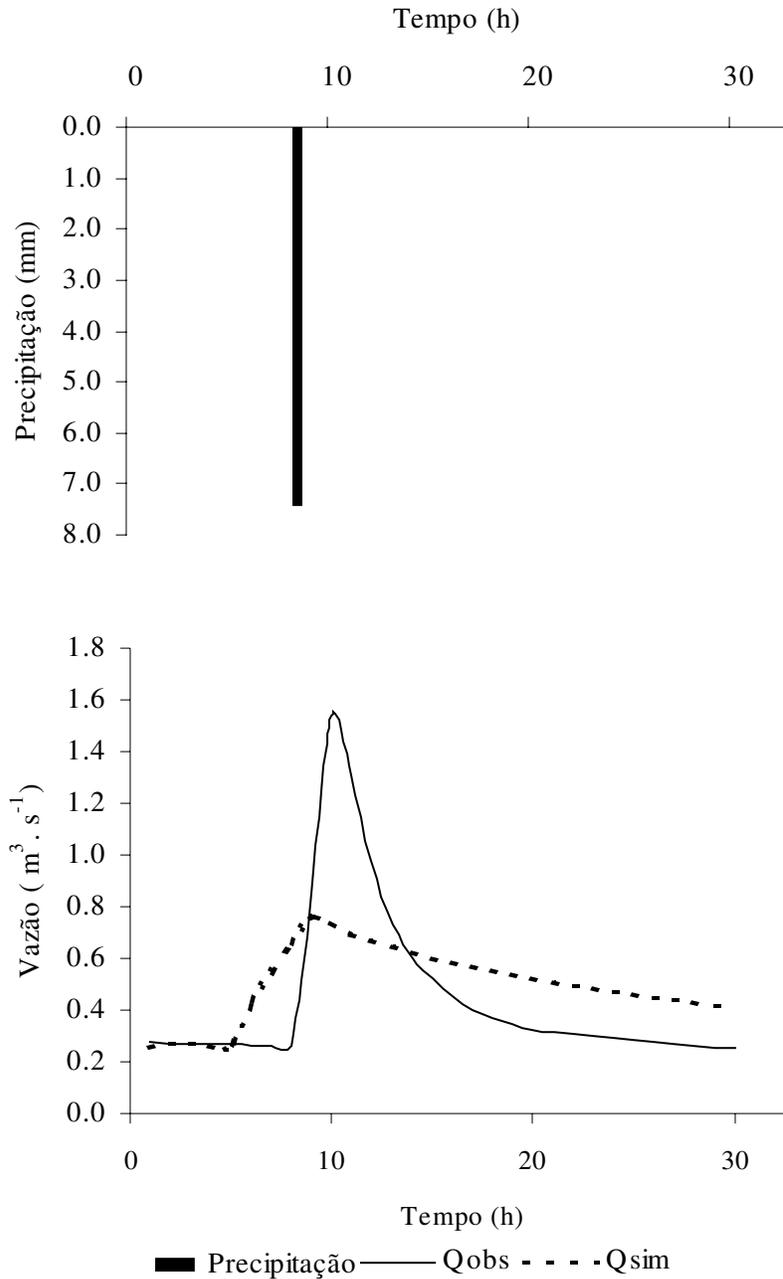


Figura B10 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de calibração utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 02 no período de 11 a 12/01/99 – 33 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP.

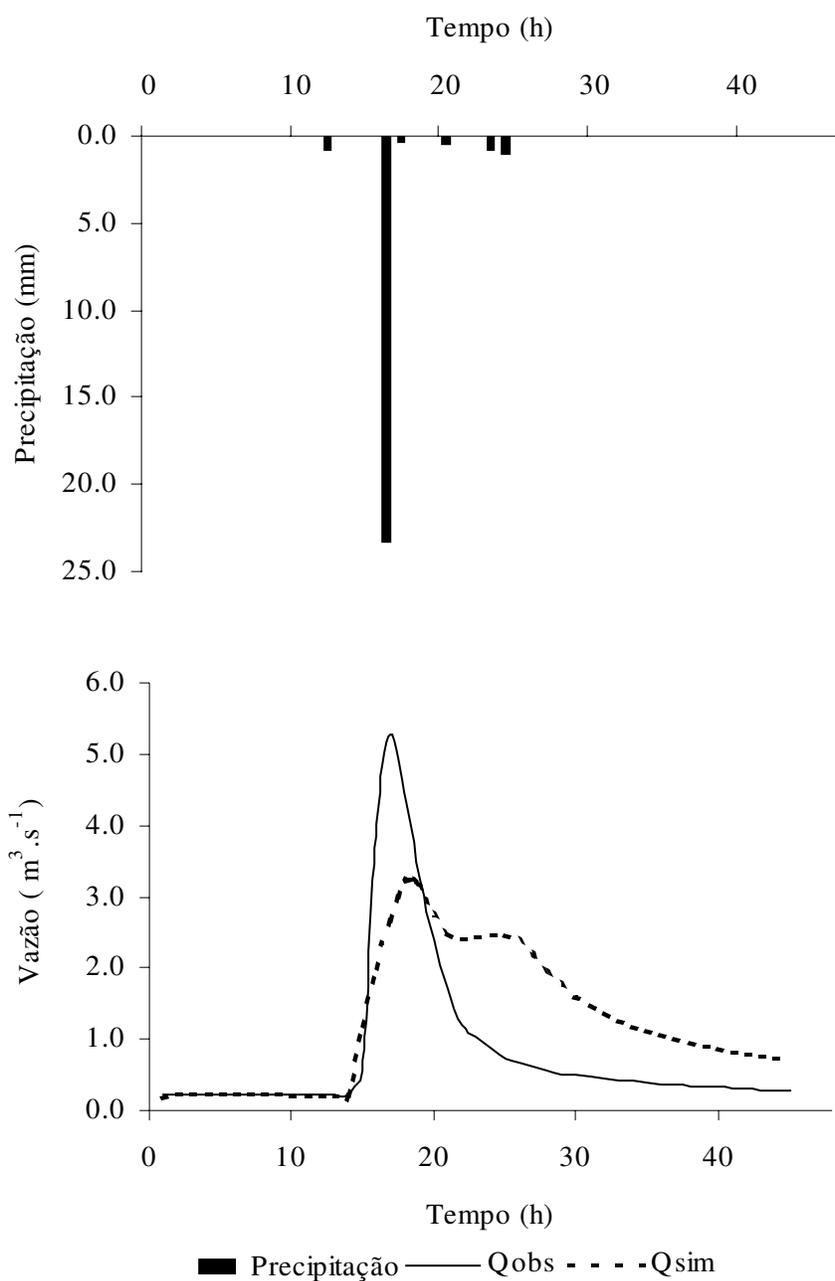


Figura B11 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de calibração utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 07 no período de 01 a 02/03/99 – 47 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP.

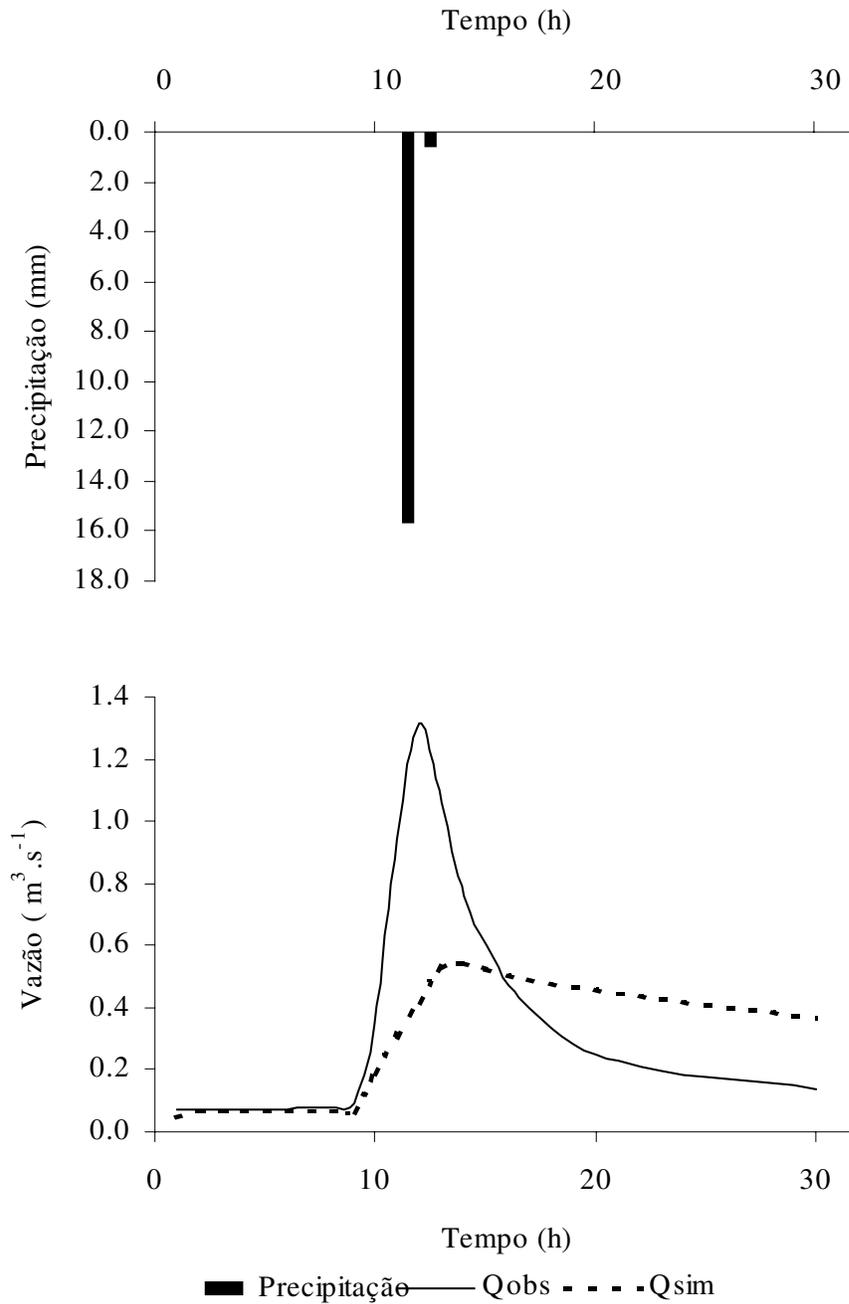


Figura B12 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de calibração utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 11 no período de 23 a 24/02/00 – 32 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP

Apêndice C: **Hidrogramas de simulação nos processos de validação**

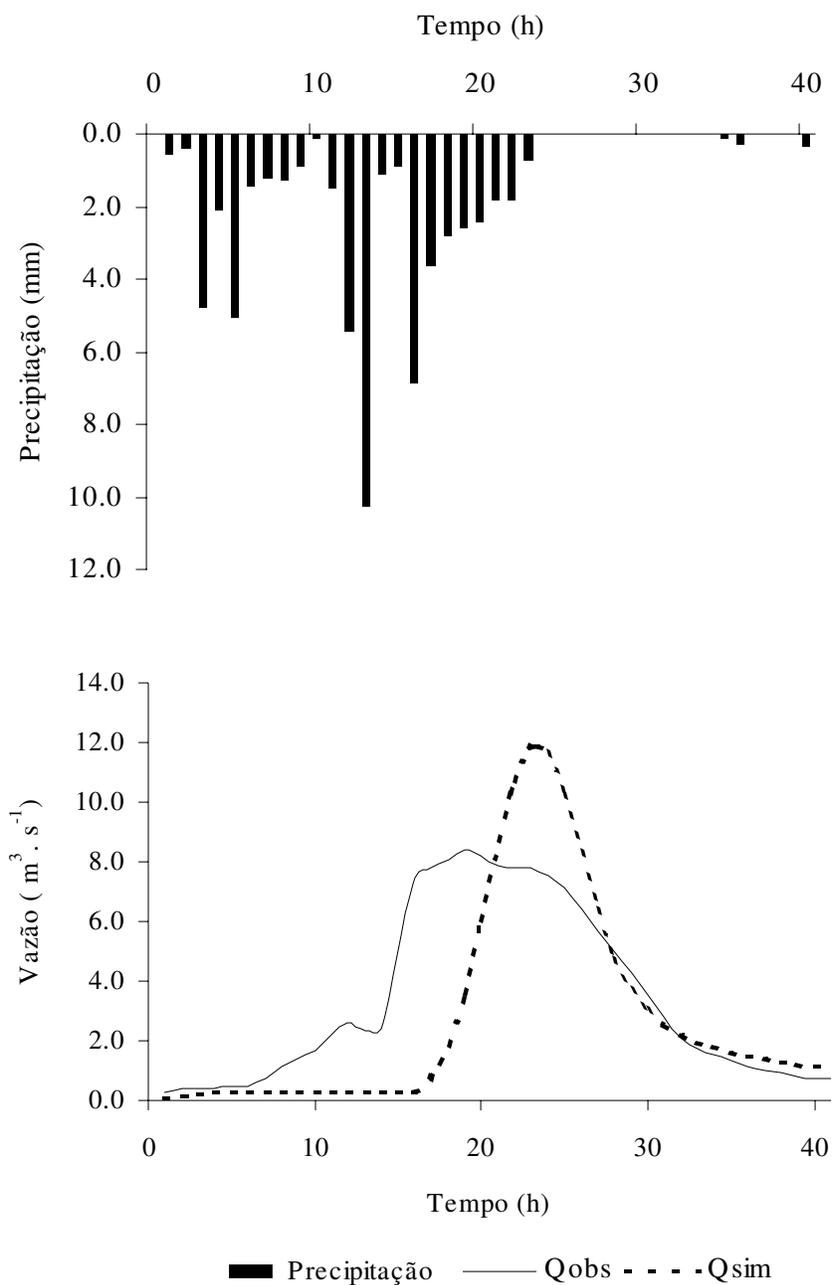


Figura C1 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 01 no período de 05 a 07/01/99 – 43 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba–SP.

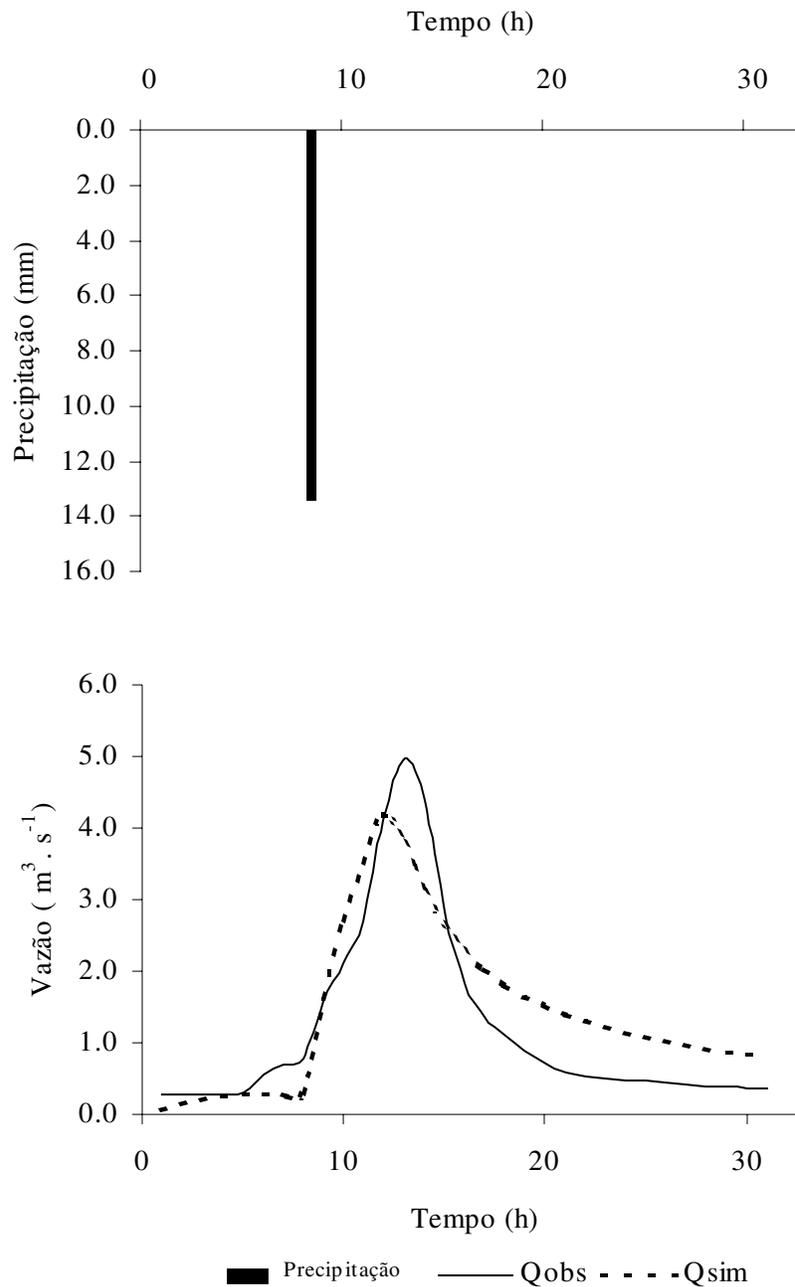


Figura C2 – Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 02 no período de 01 a 02/02/99 – 28 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho –Piracicaba–SP.

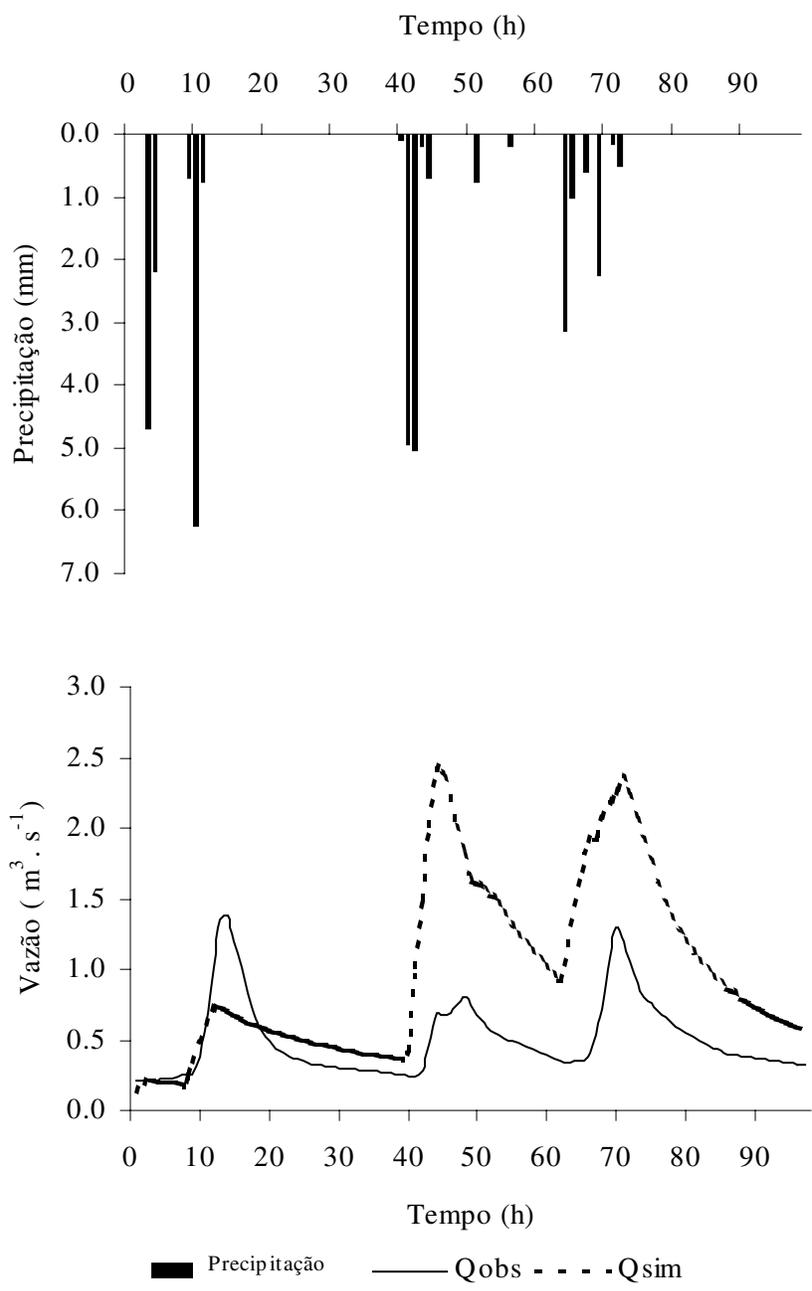


Figura C3 – Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 03 no período de 07 a 11/02/99 – 99 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho –Piracicaba–SP.

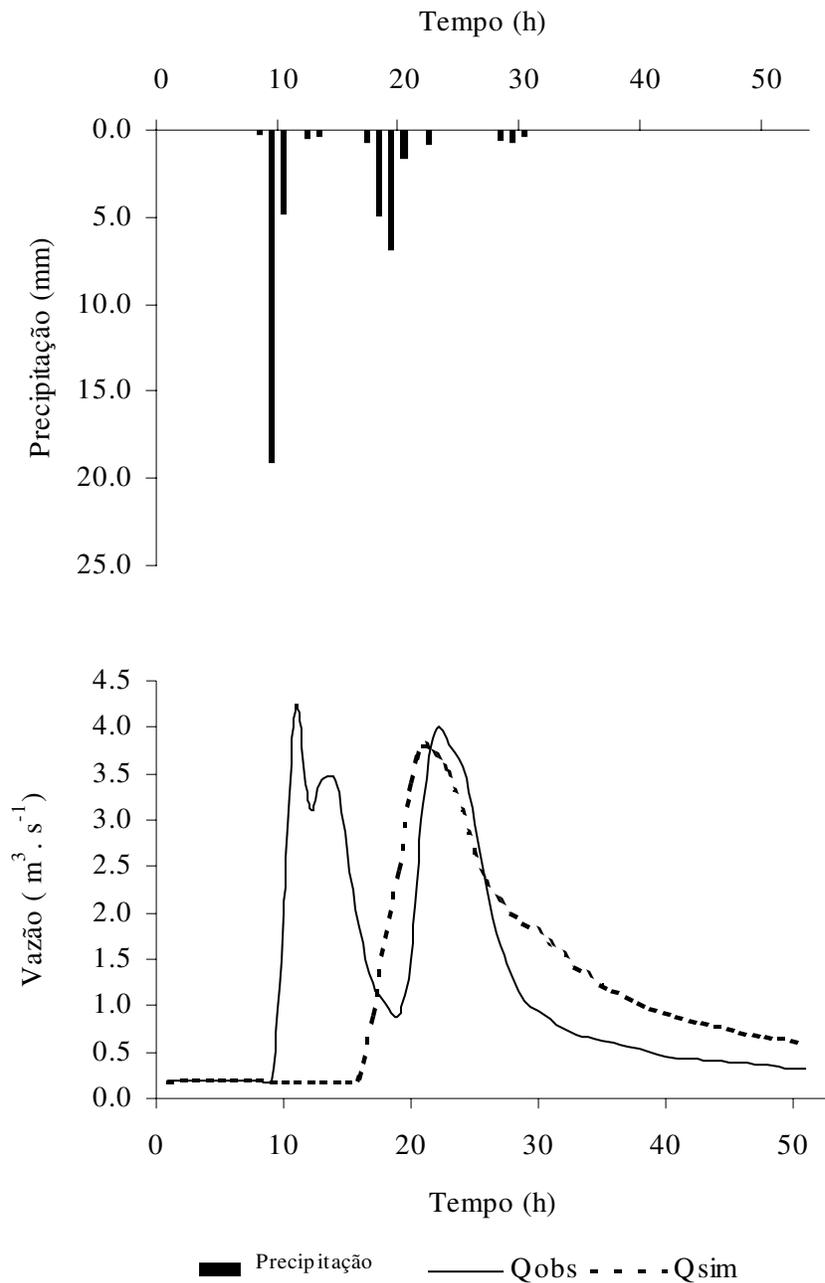


Figura C4 – Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 04 no período de 20 a 22/02/99 – 50 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba-SP.

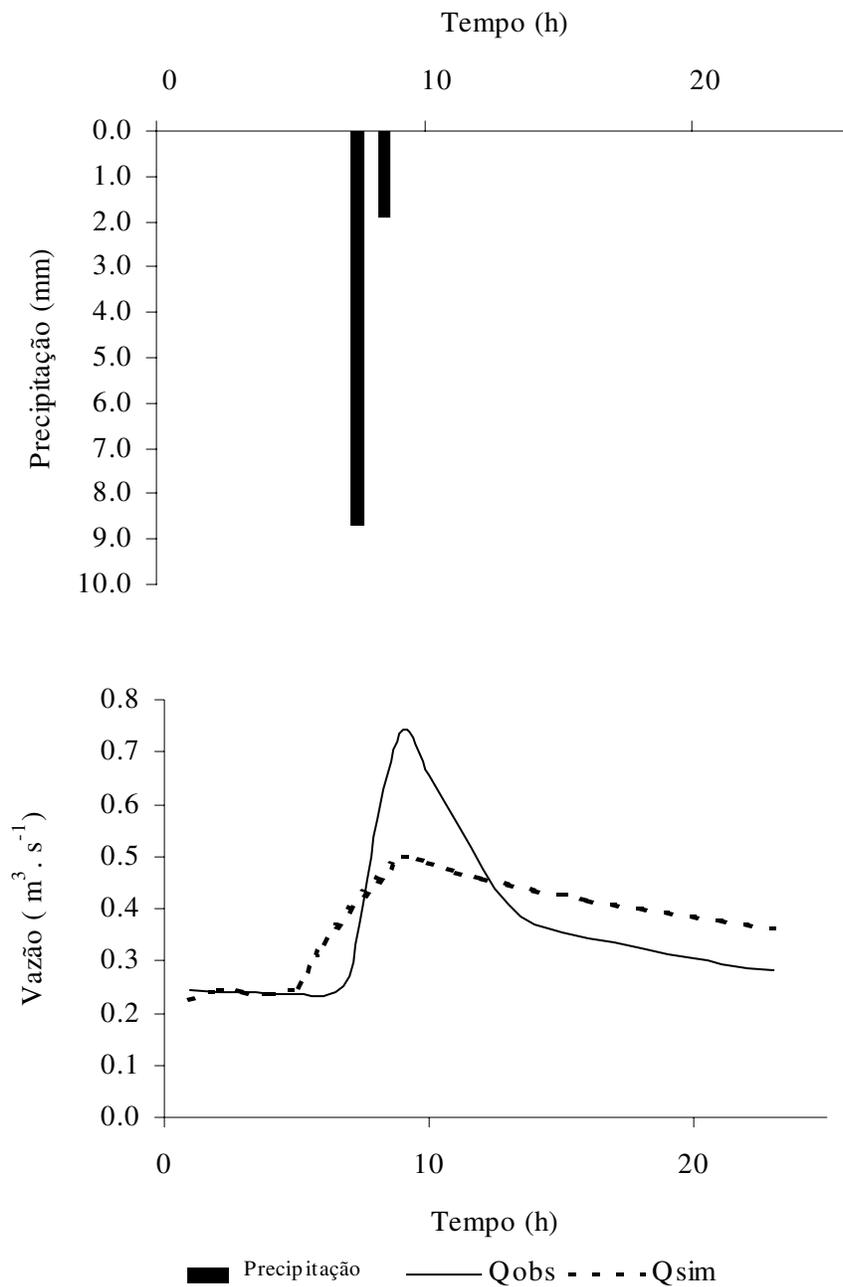


Figura C5 – Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 05 no período de 23 a 24/02/99 – 26 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba-SP.

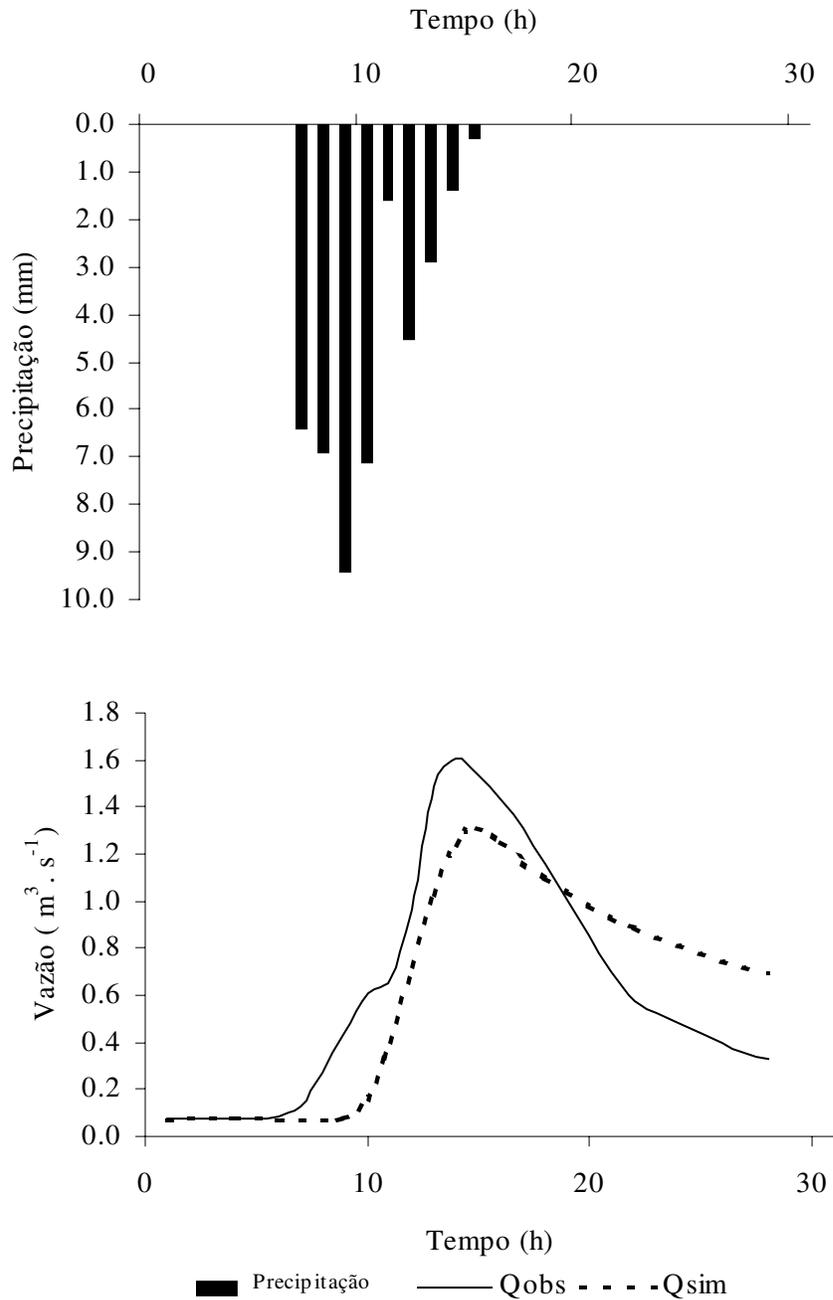


Figura C6 – Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 06 no período de 06 a 08/05/99 – 40 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba–SP.

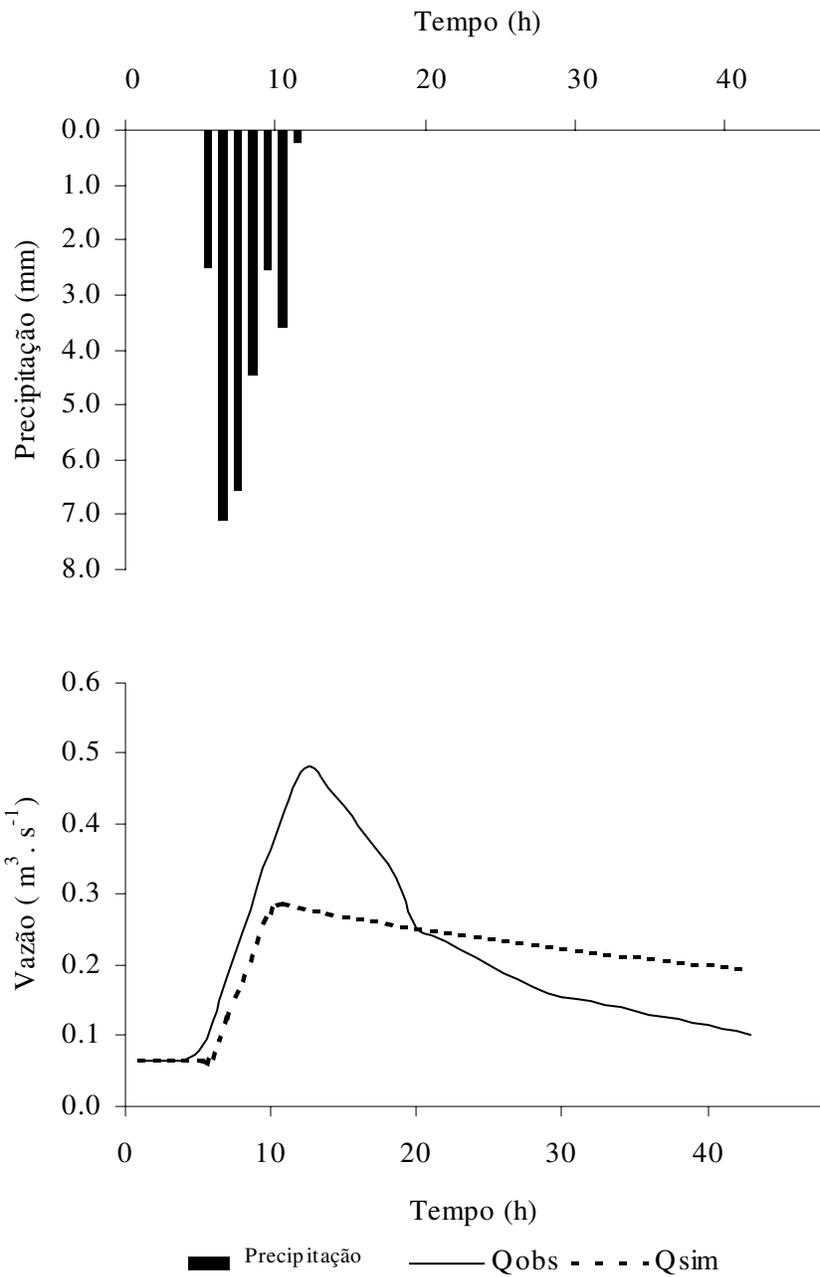


Figura C7 – Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 07 no período de 14 a 18/06/00 – 106 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP.

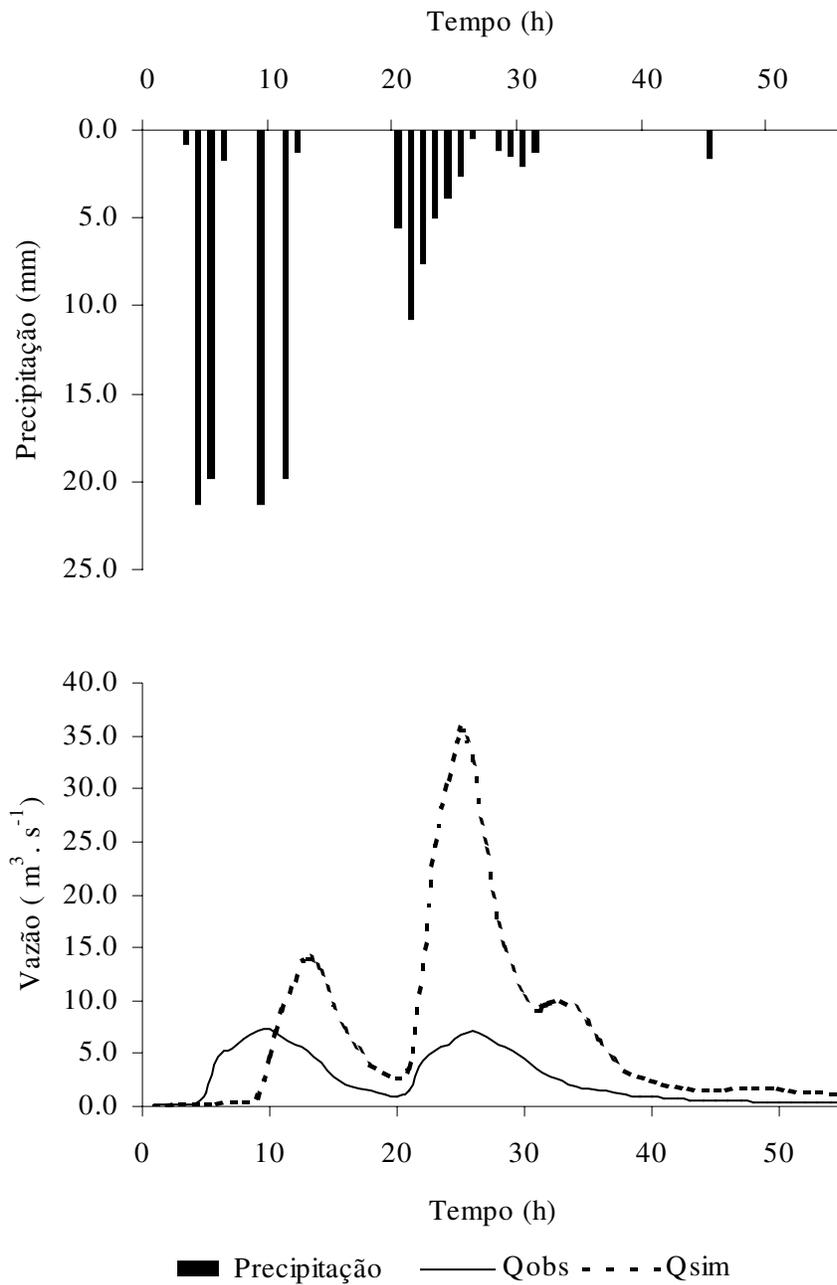


Figura C8 – Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 08 no período de 01 a 03/01/00 – 56 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP.

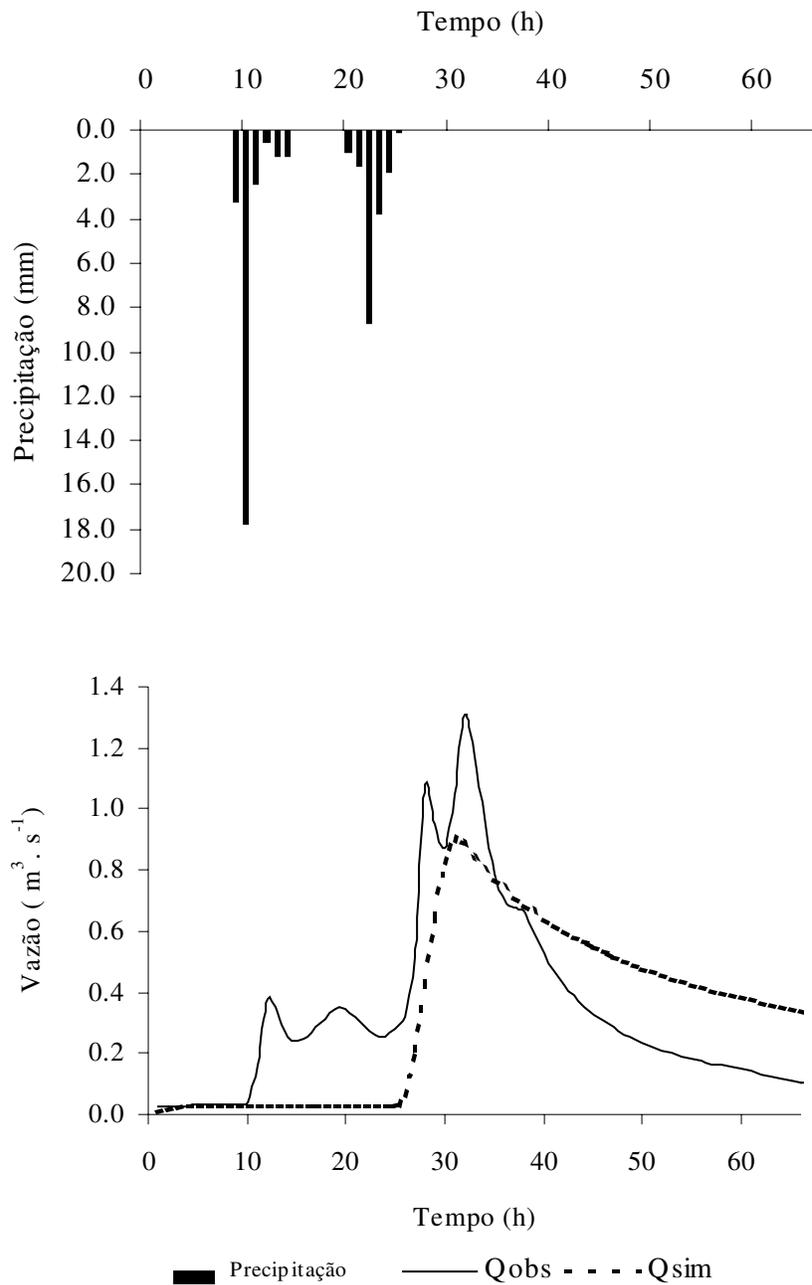


Figura C9 – Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 09 no período de 31/03 a 03/04/00 – 67 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho –Piracicaba – SP.

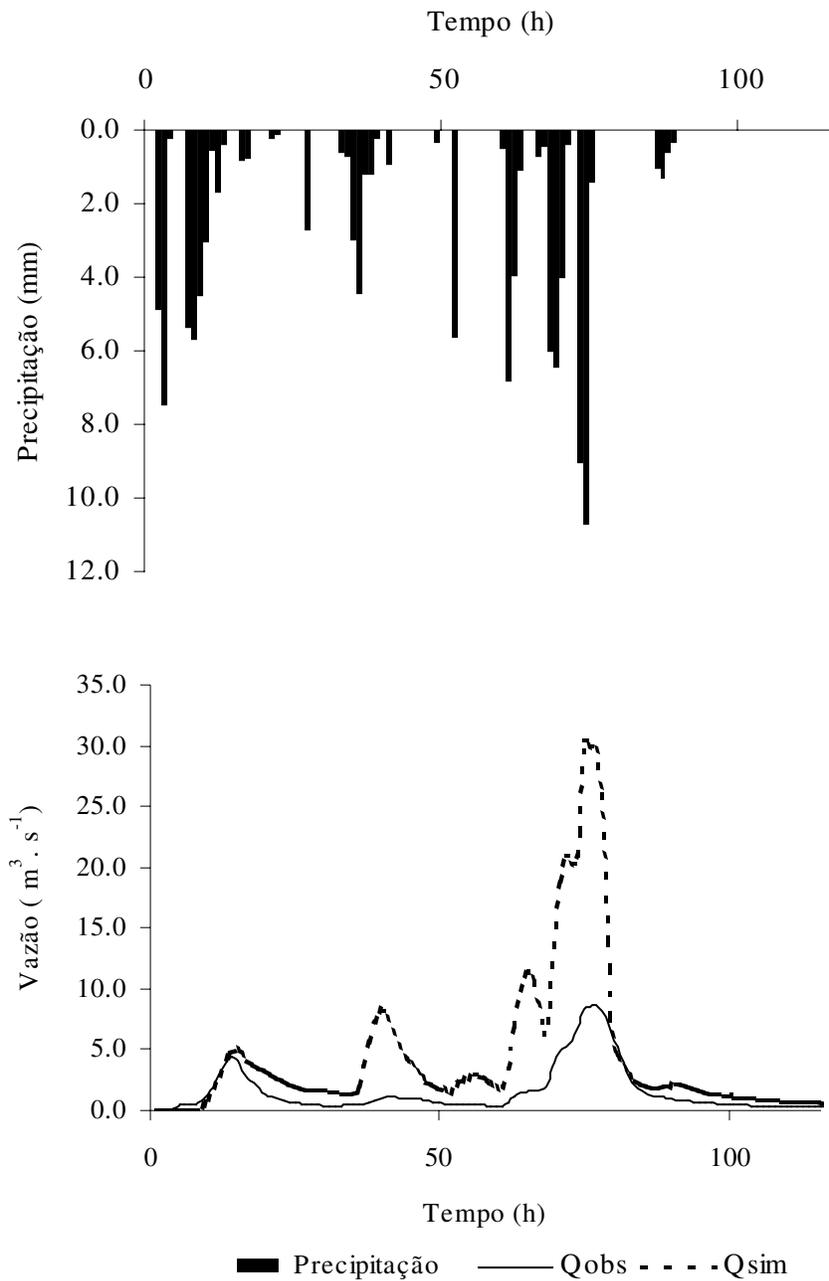


Figura C10 – Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 10 no período de 10 a 15/02/00 – 117 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho –Piracicaba – SP.

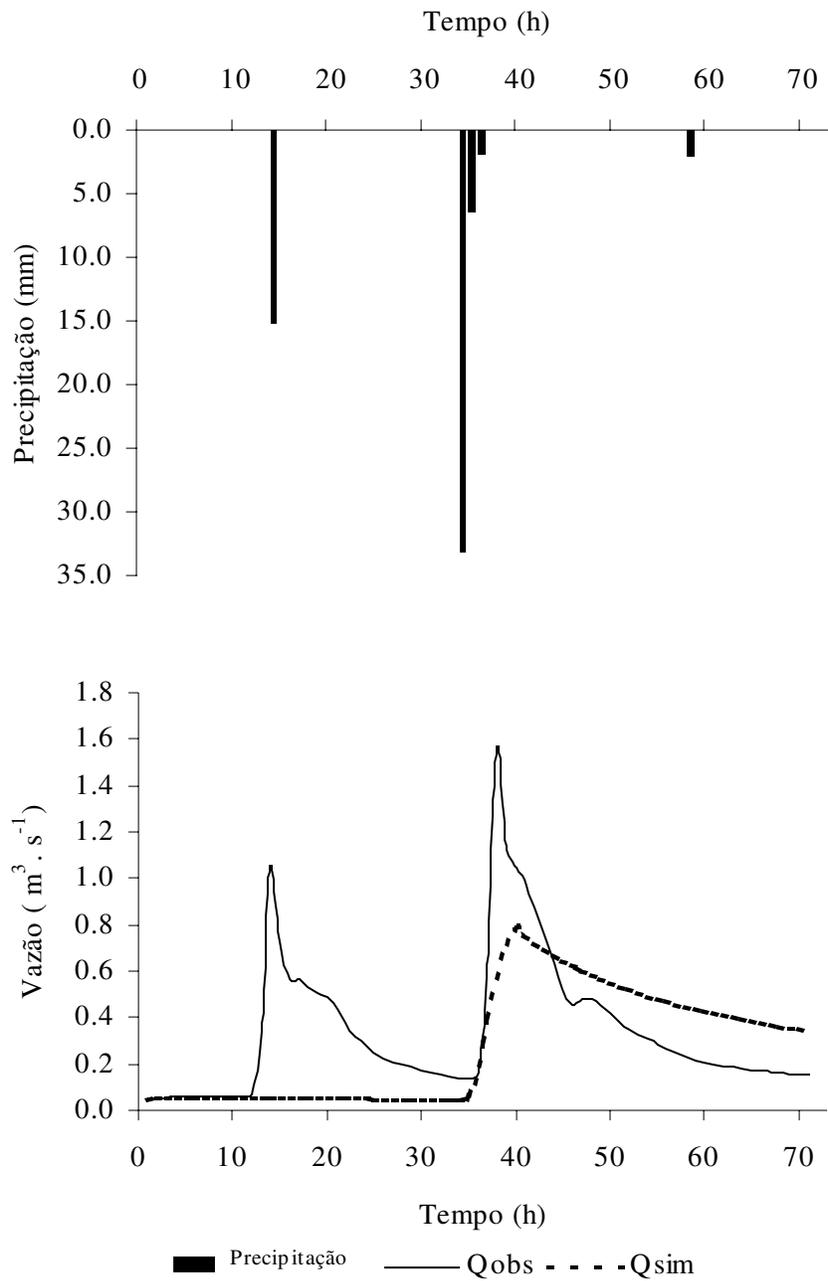


Figura C11 – Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 11 no período de 28/02 a 02/03/00 – 74 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho –Piracicaba – SP.

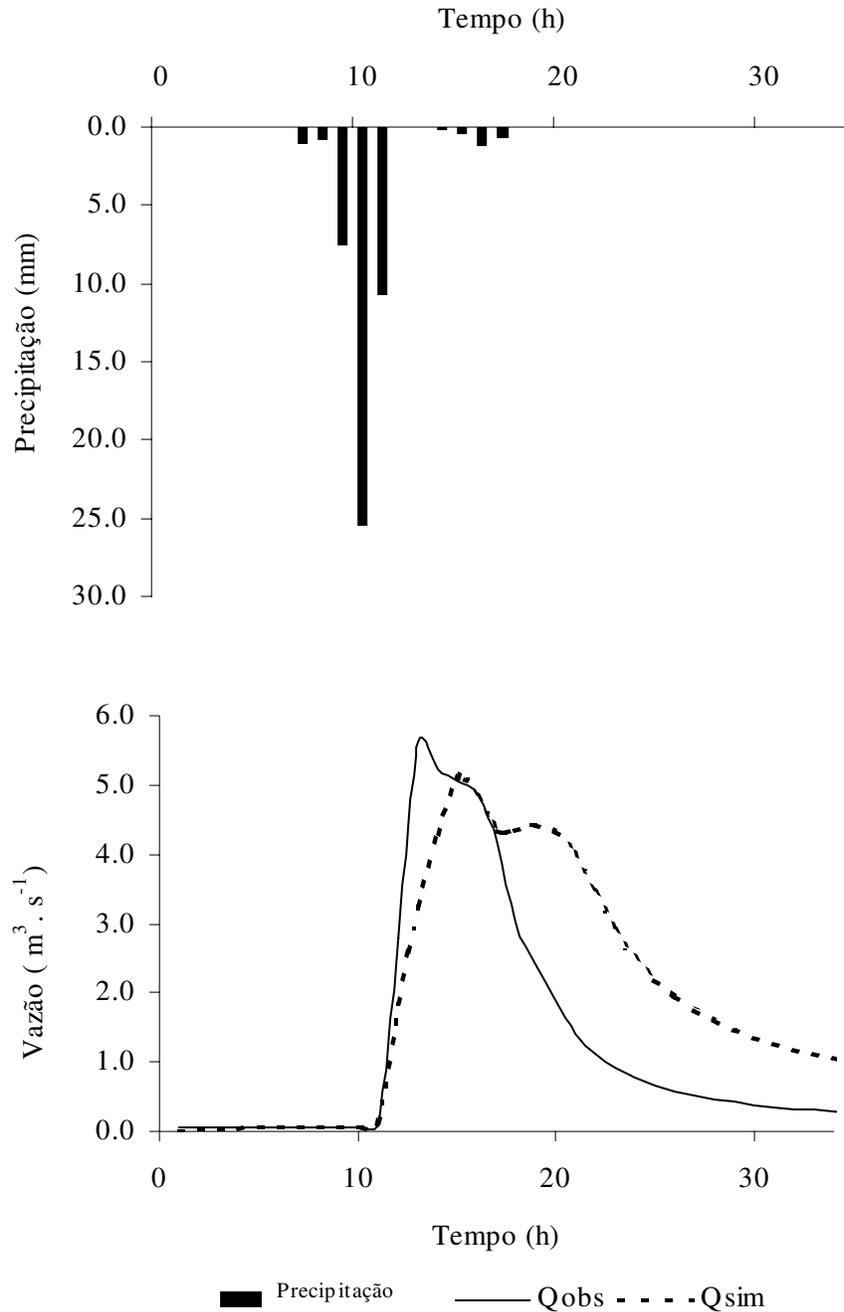


Figura C12 – Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 12 no período de 21 a 22/03/00 – 31 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP.

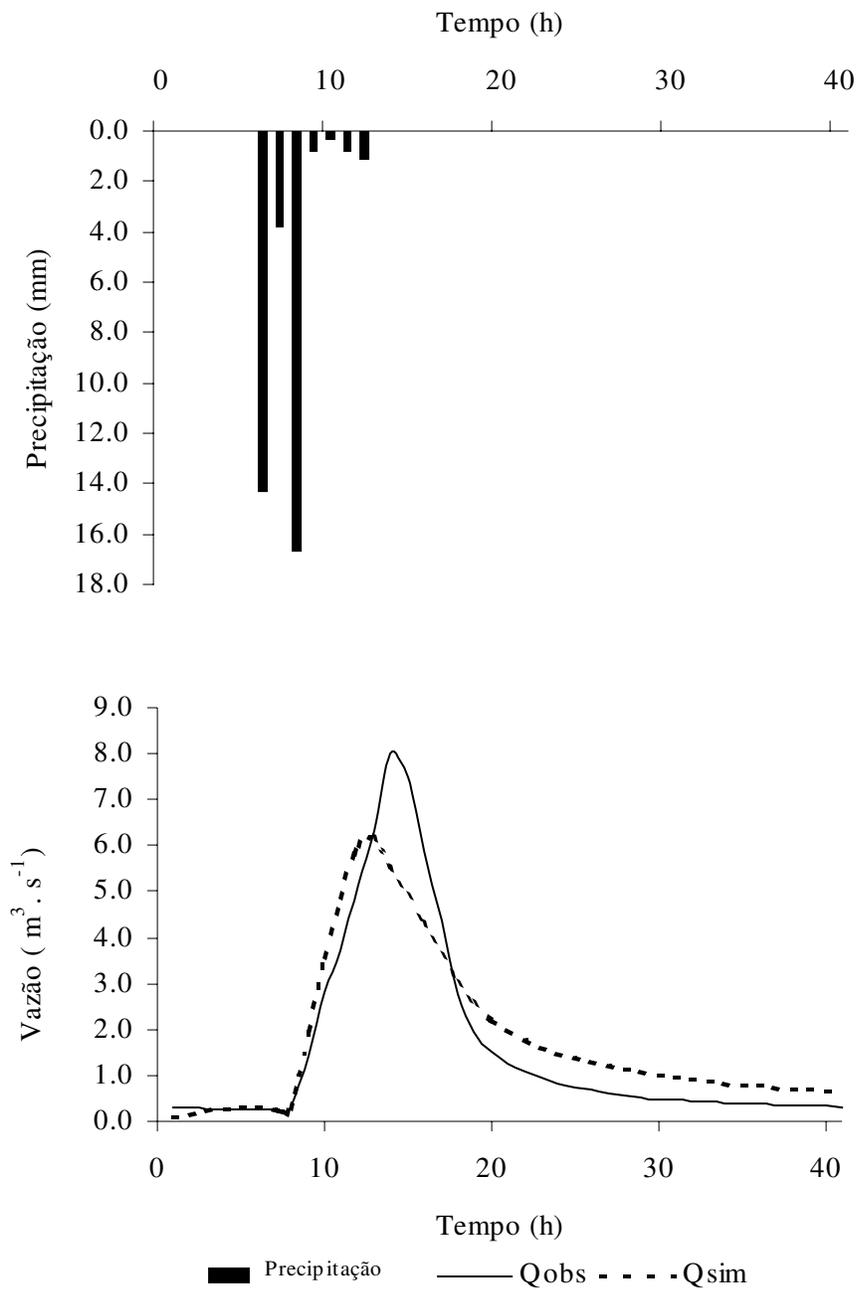


Figura C13 – Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 13 no período de 28 a 30/03/00 – 41 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP.

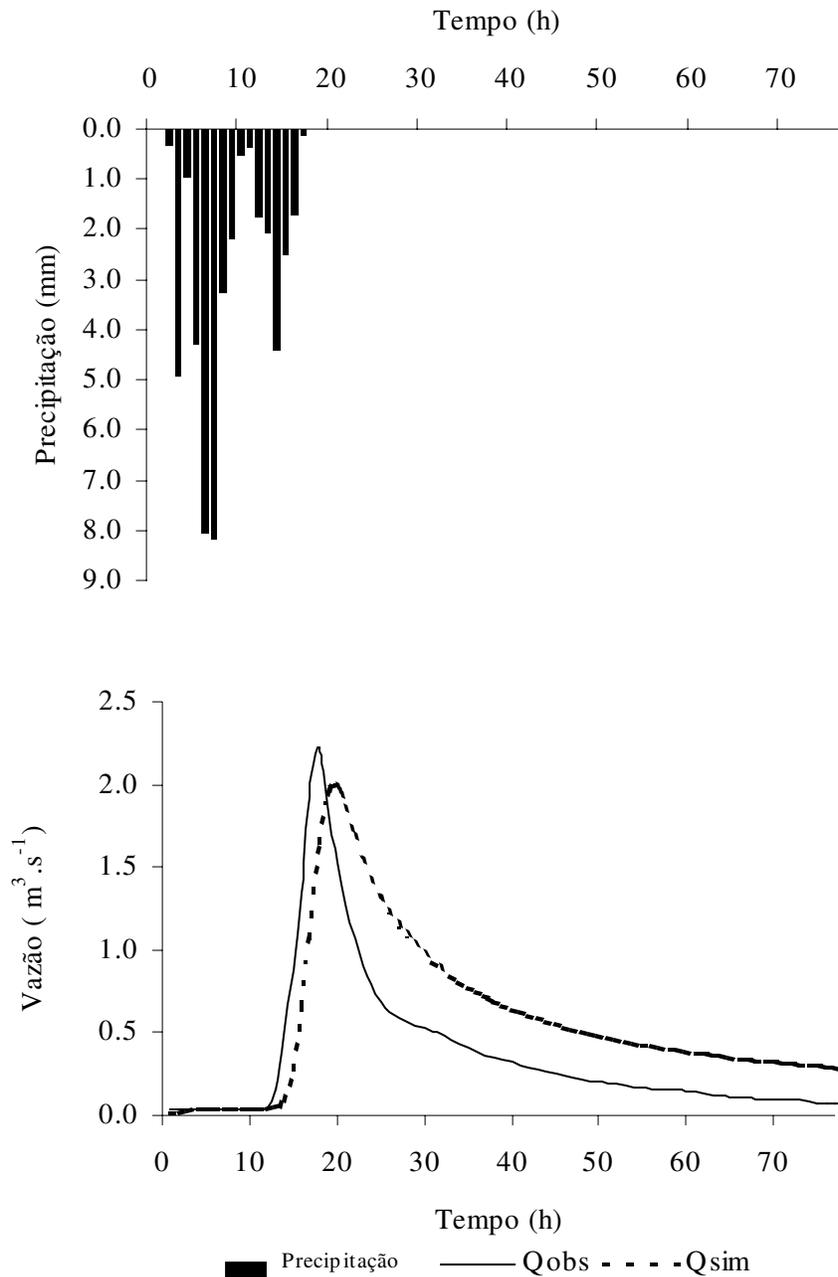


Figura C14 – Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 14 no período de 01 a 04/09/00 – 78 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho –Piracicaba – SP.

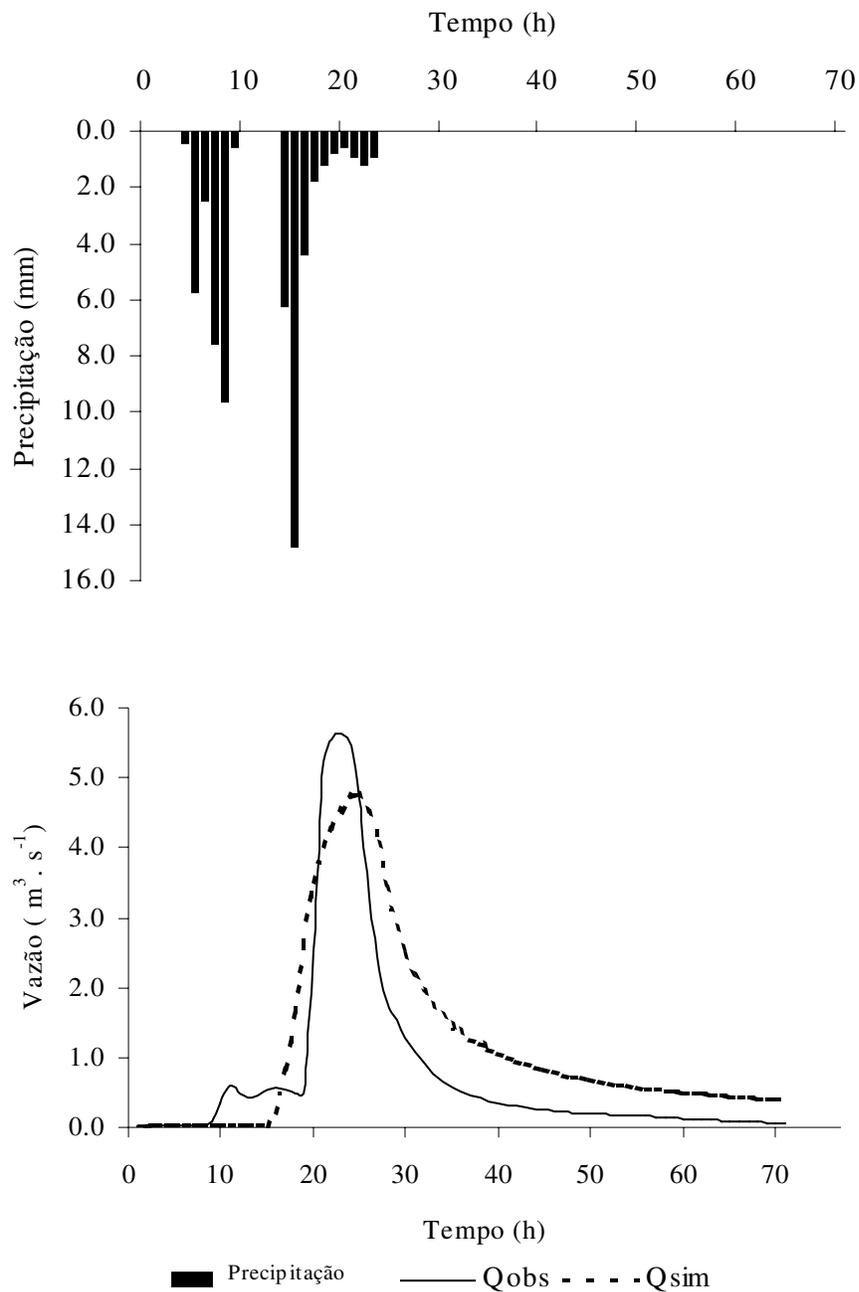


Figura C15 – Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 15 no período de 24 a 27/11/00 – 71 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP.

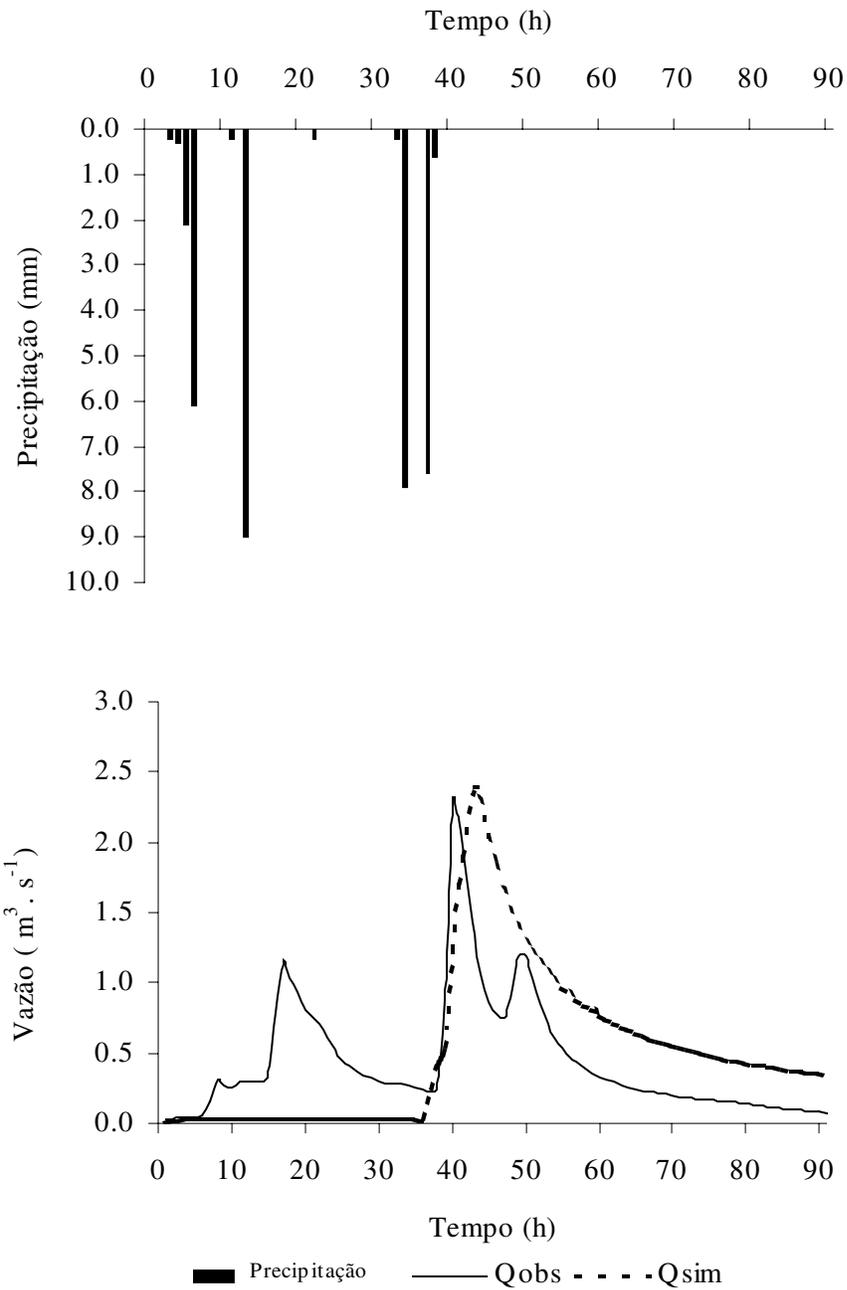


Figura C16 – Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 16 no período de 04 a 07/12/00 – 91 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho –Piracicaba – SP.

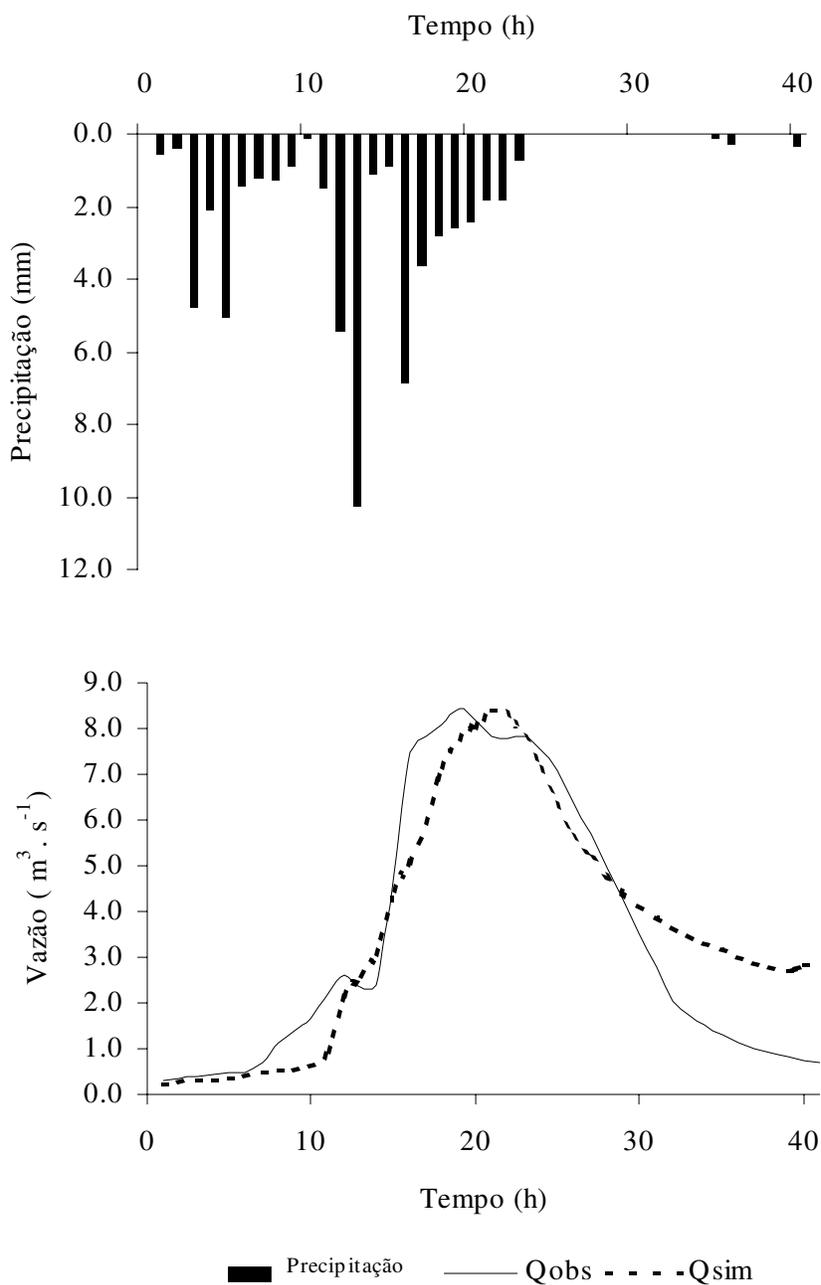


Figura C17 - Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação pela equação  $y = 0,0002P - 0,0012$ , utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 01 no período de 05 a 07/01/99 – 43 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP.

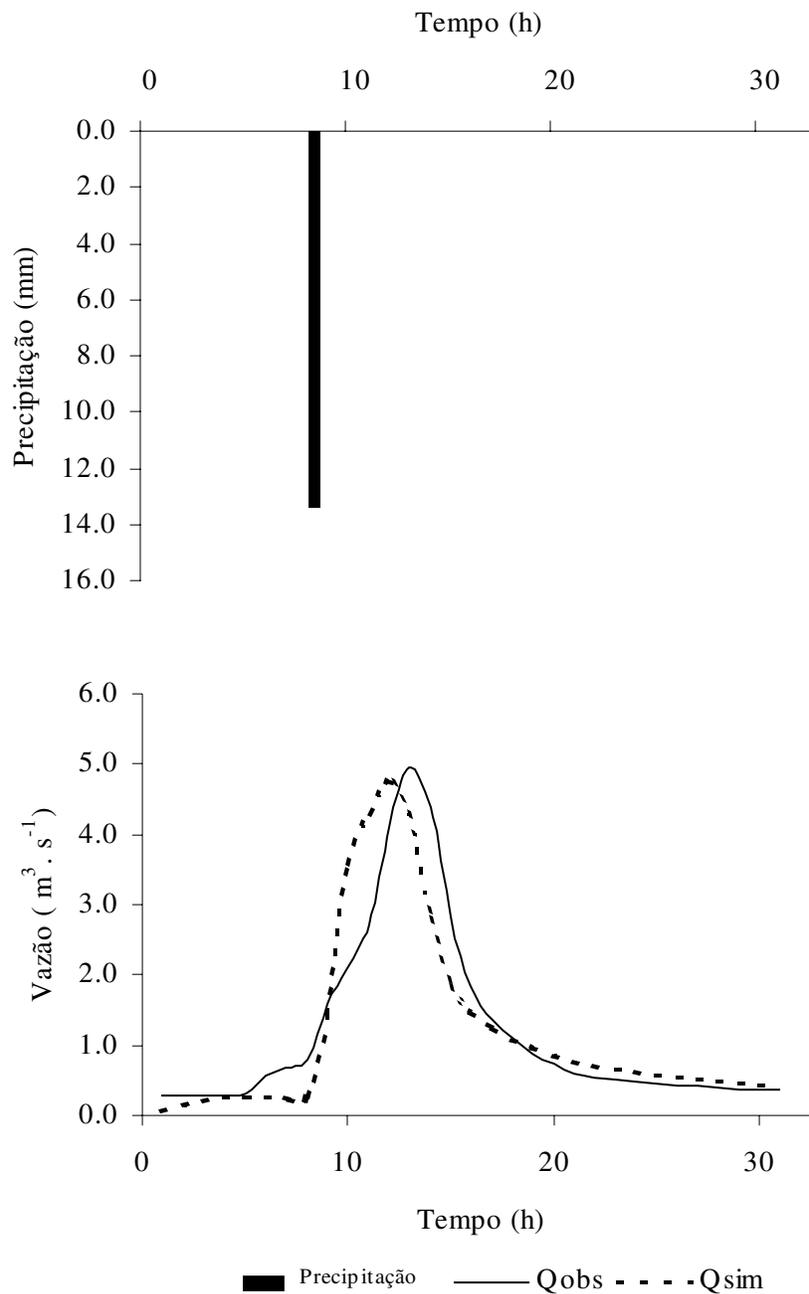


Figura C18 – Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação pela equação  $y = 0,0002P - 0,0012$ , utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 02 no período de 01 a 02/02/99 – 28 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão Marins seção Monjolinho – Piracicaba – SP.

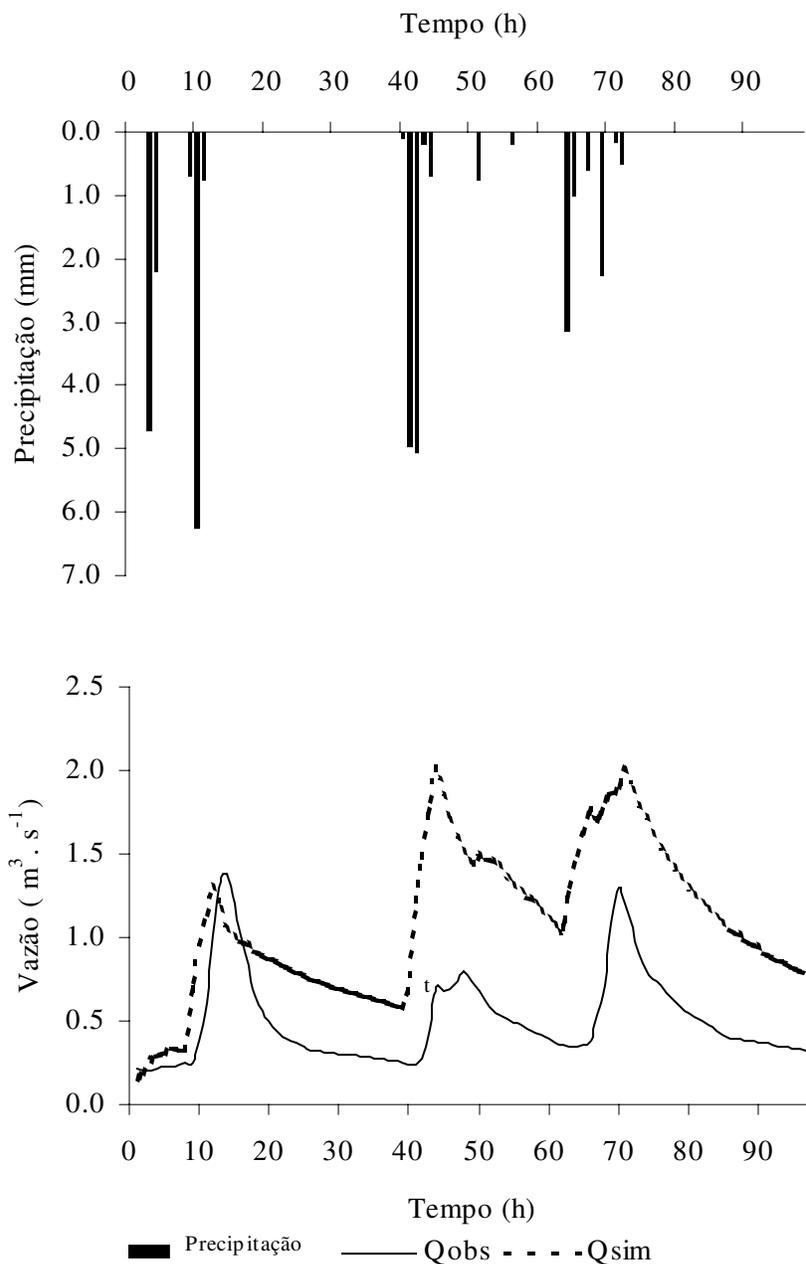


Figura C19 – Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação pela equação  $y = 0,0002P - 0,0012$ , utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 03 no período de 07 a 11/02/99 – 99 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP.

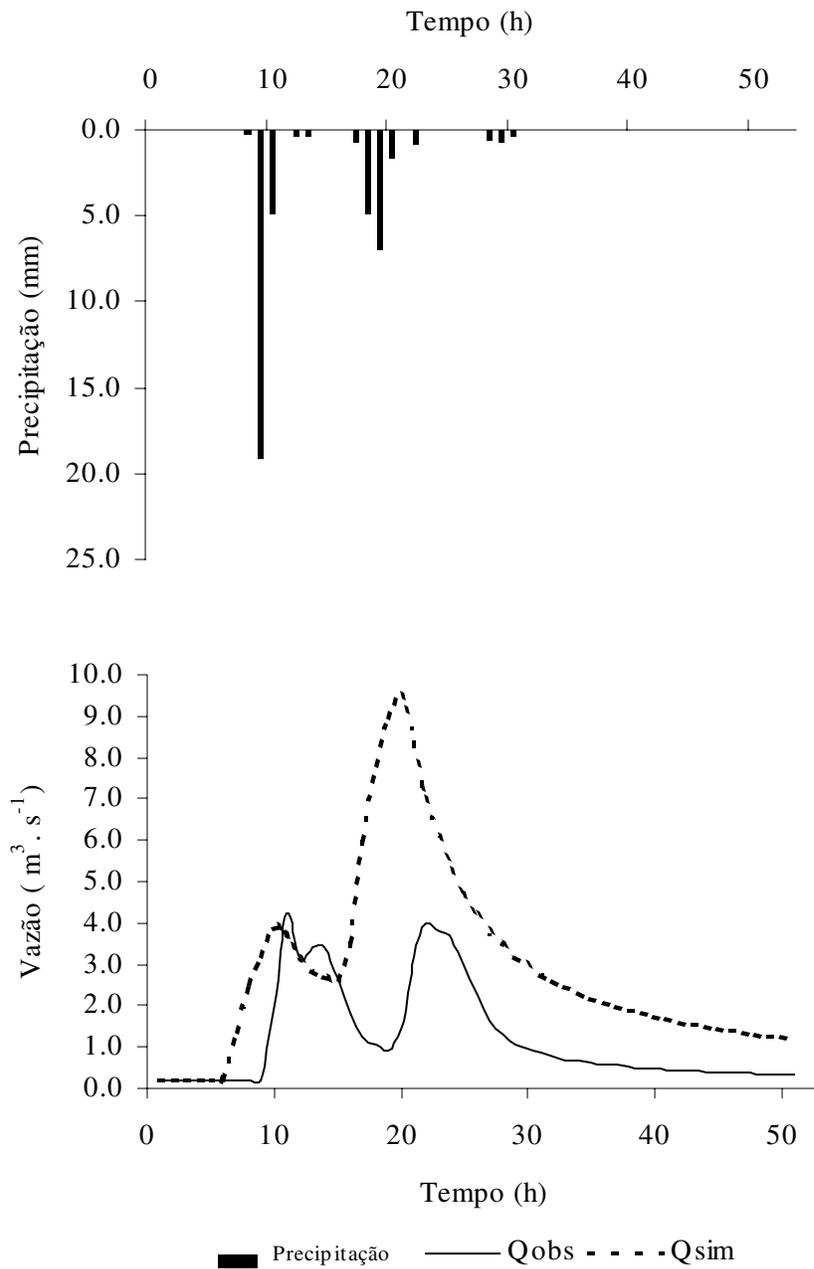


Figura C20 – Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação pela equação  $y = 0,0002P - 0,0012$ , utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 04 no período de 20 a 22/02/99 – 50 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP.

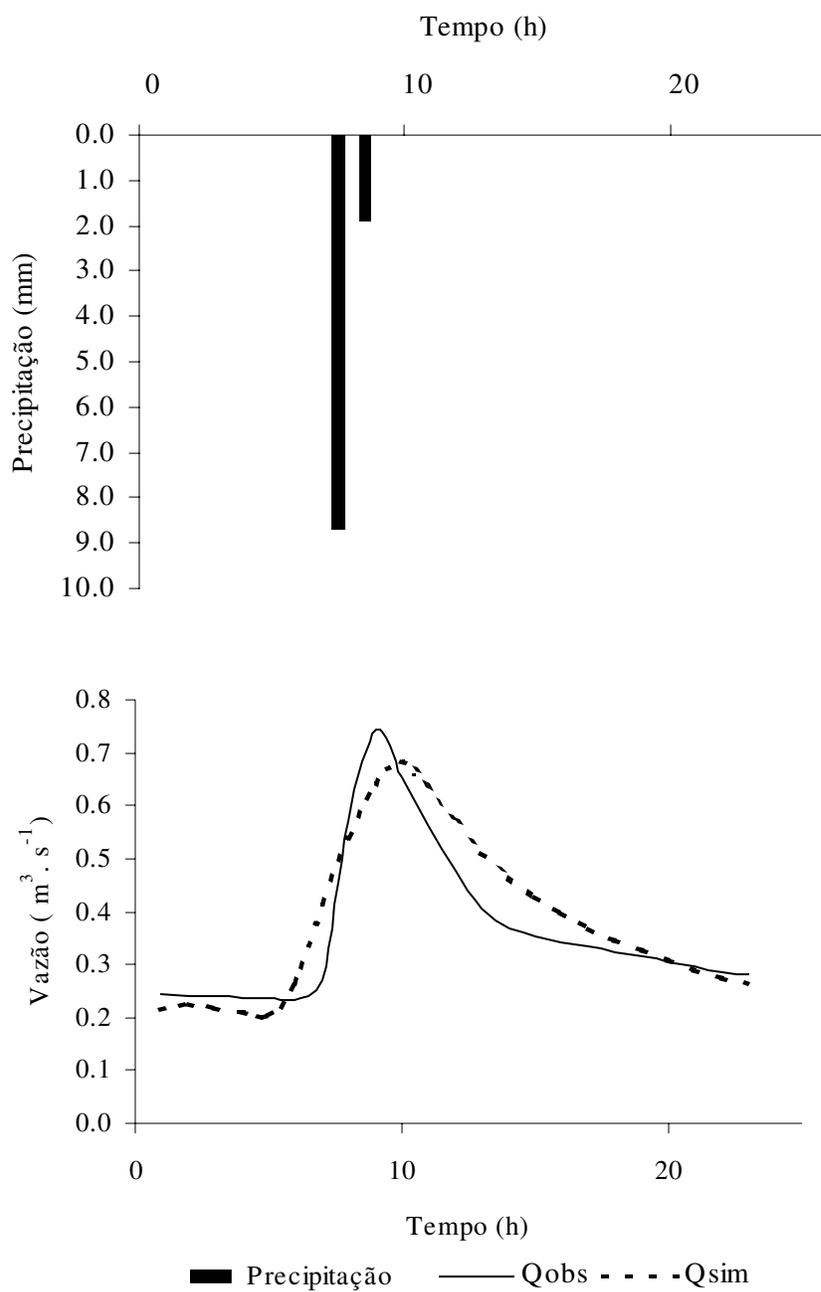


Figura C21 – Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação pela equação  $y = 0,0002P - 0,0012$ , utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 05 no período de 23 a 24/02/99 – 26 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP.

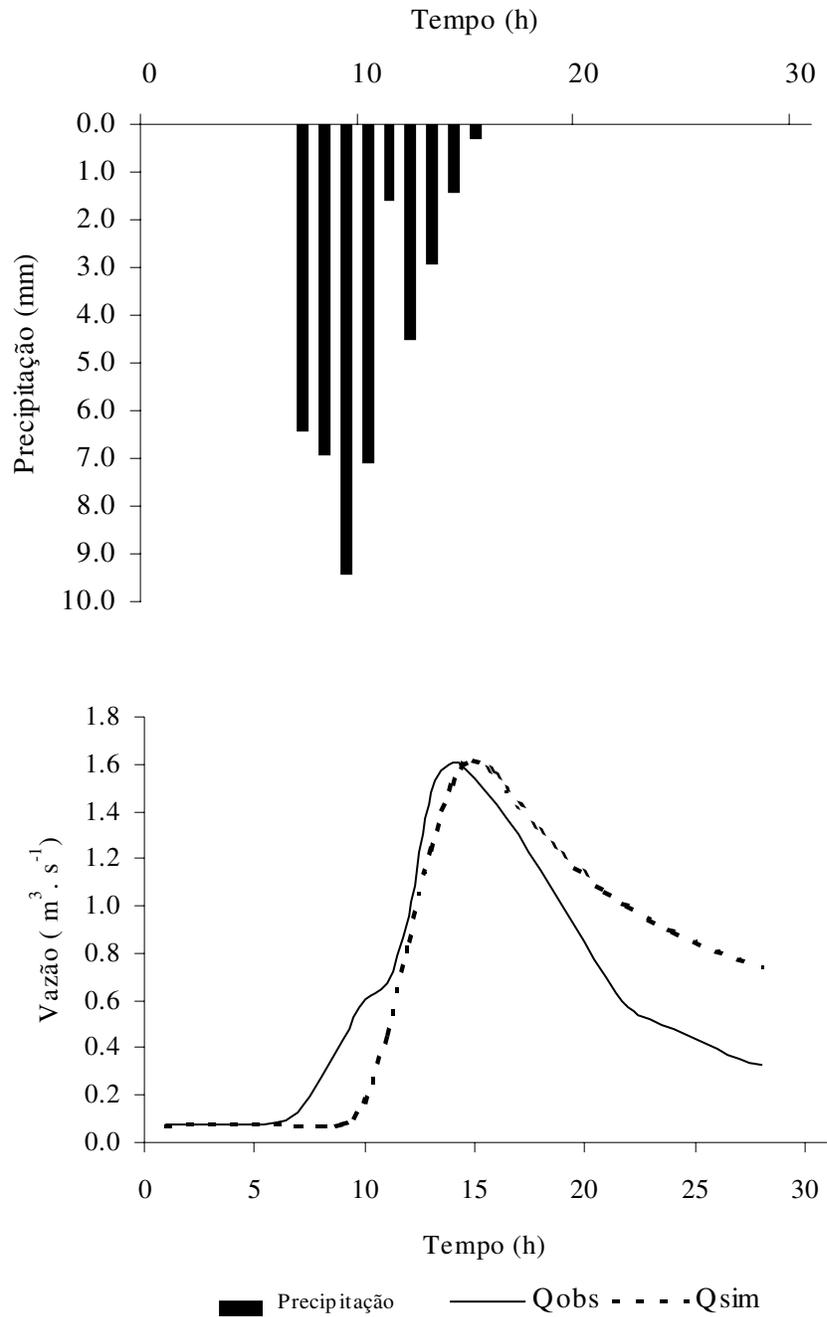


Figura C22 – Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação pela equação  $y = 0,0002P - 0,0012$ , utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 06 no período de 06 a 08/05/99 – 40 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP.

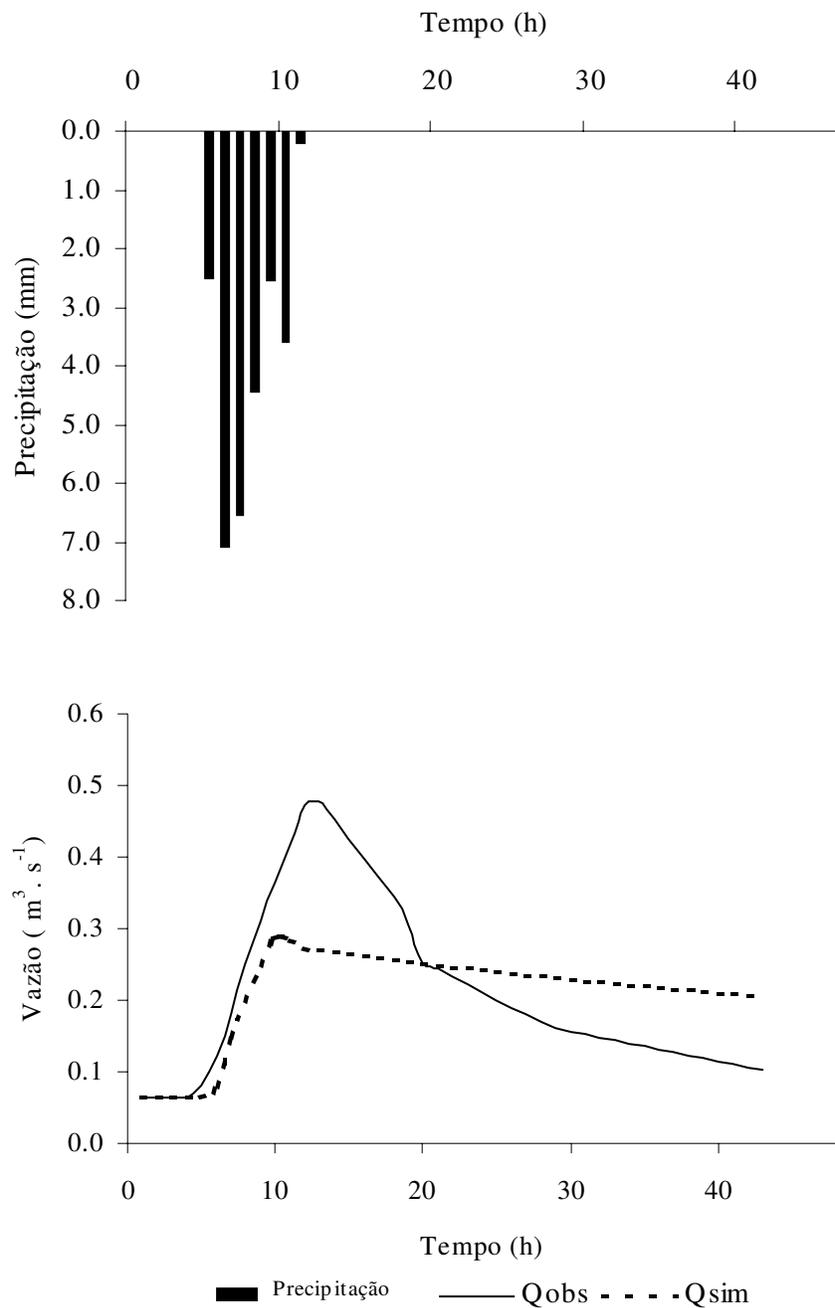


Figura C23 – Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação pela equação  $y = 0,0002P - 0,0012$ , utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 07 no período de 14 a 18/06/00 – 106 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP.

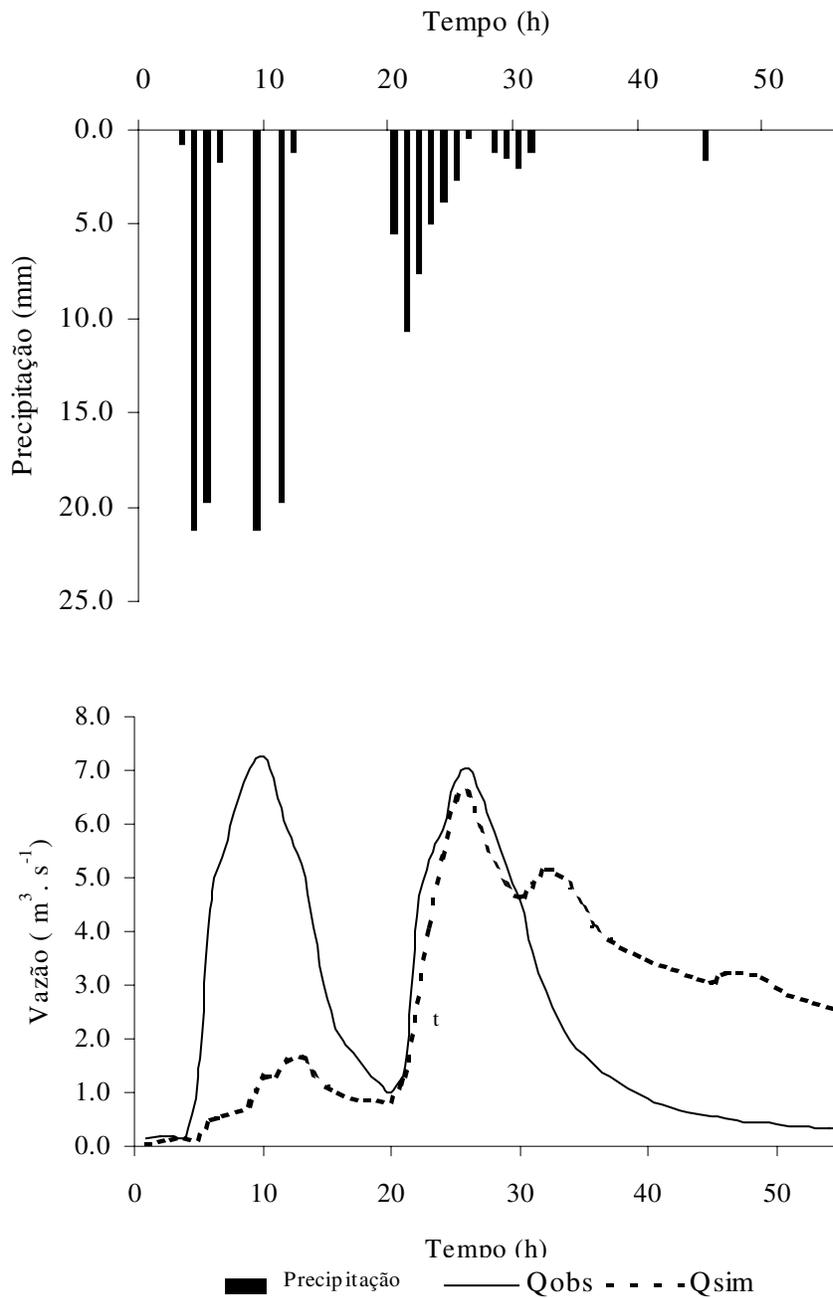


Figura C24 – Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação pela equação  $y = 0,0002P - 0,0012$ , utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 08 no período de 01 a 03/01/00 – 56 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP.

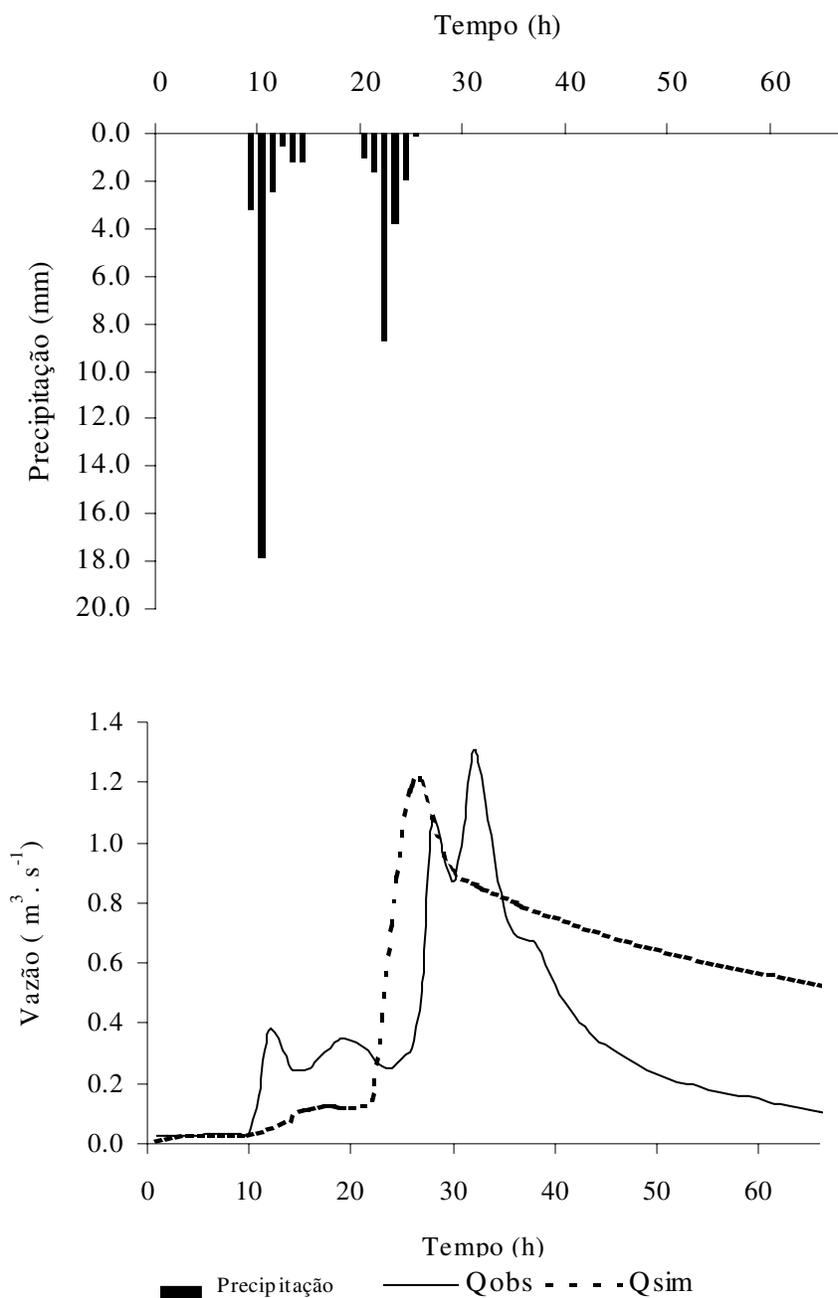


Figura C25 – Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação pela equação  $y = 0,0002P - 0,0012$ , utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 09 no período de 31/03 a 03/04/00 – 67 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP.

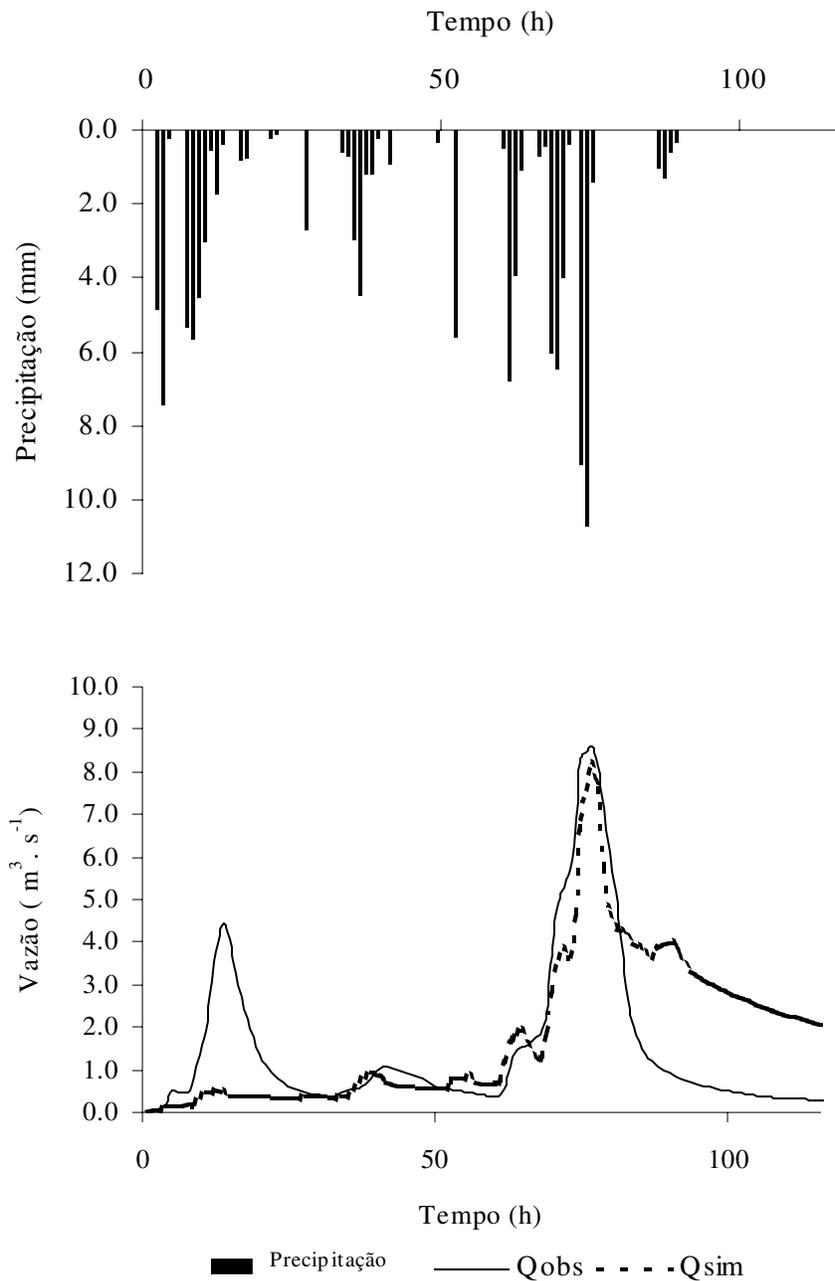


Figura C26 – Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação pela equação  $y = 0,0002P - 0,0012$ , utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 10 no período de 10 a 15/02/00 – 117 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP.

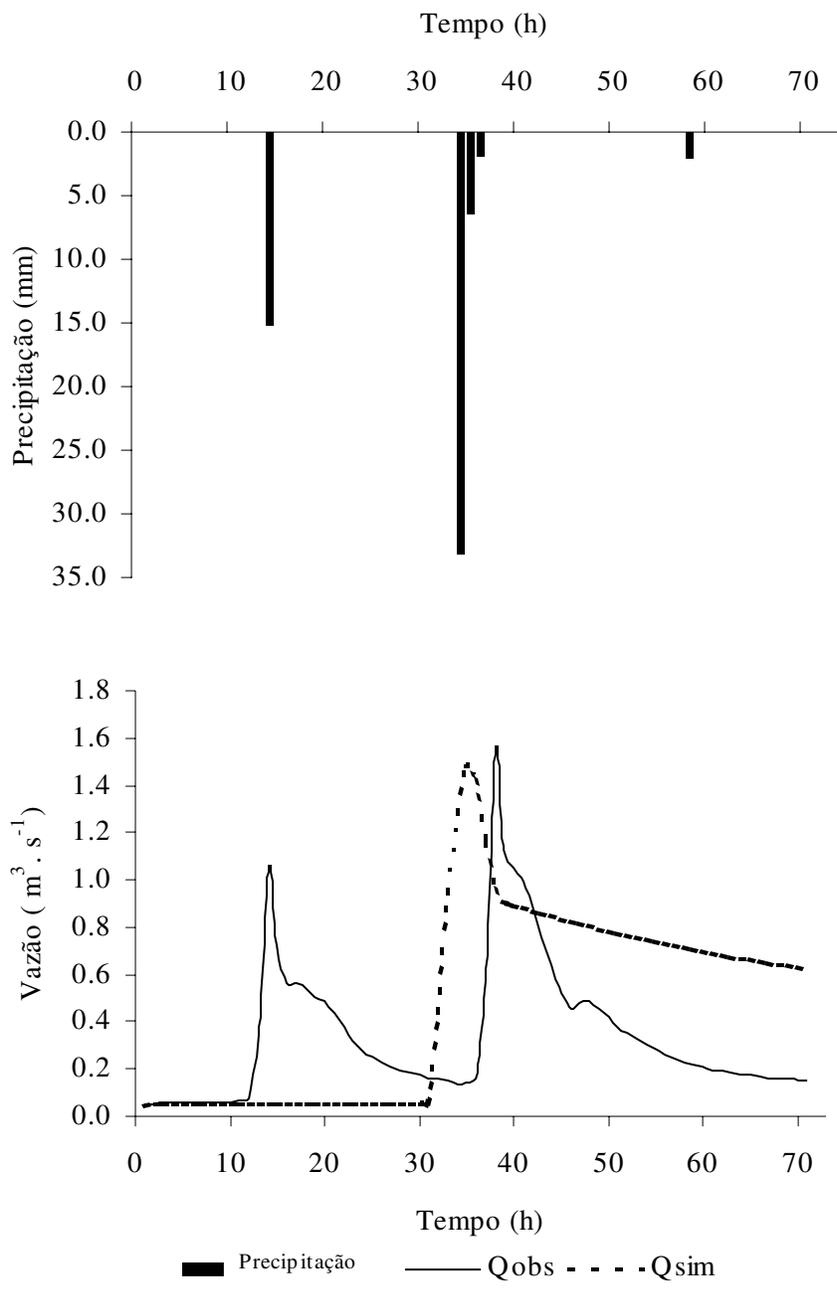


Figura C27 – Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação pela equação  $y = 0,0002P - 0,0012$ , utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 11 no período de 28/02 a 02/03/00 – 74 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP.

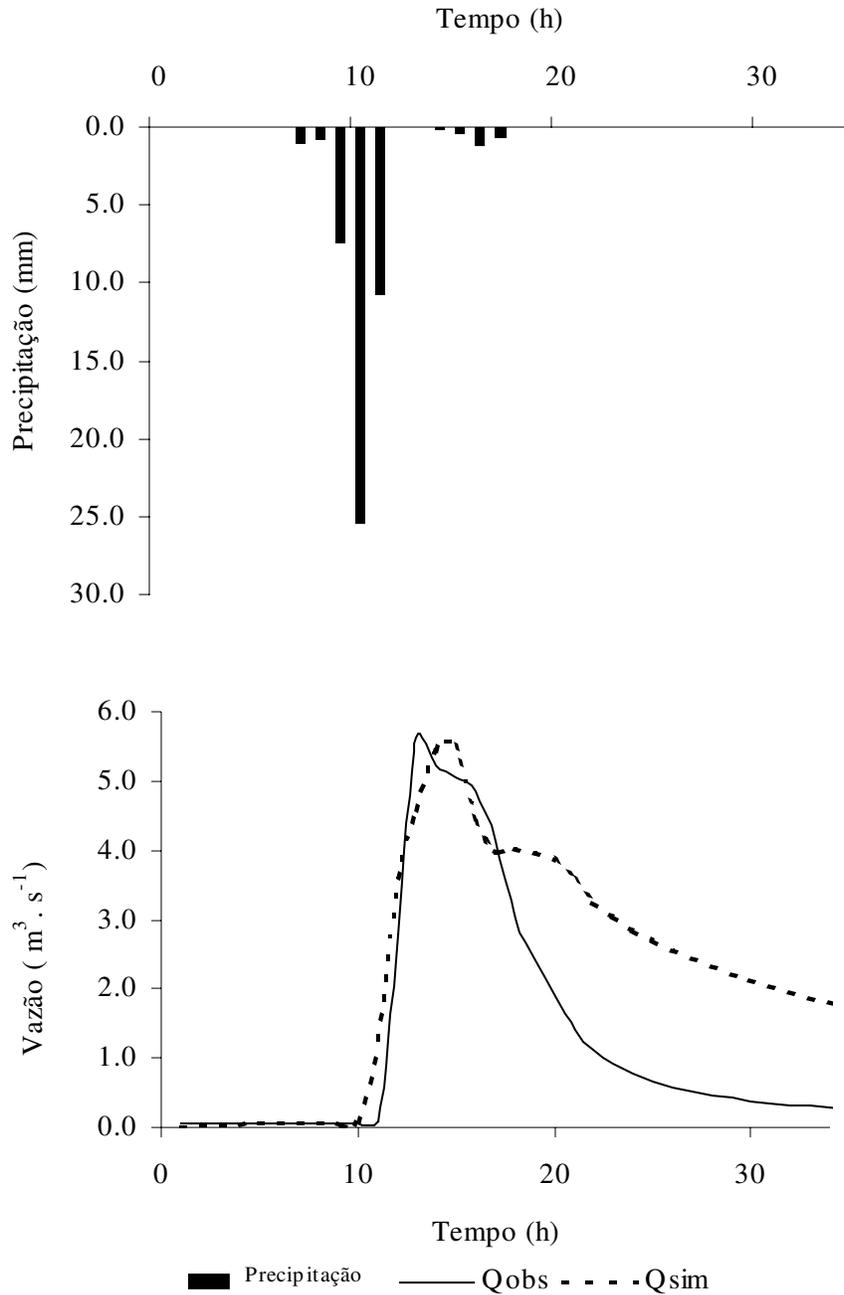


Figura C28 – Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação pela equação  $y = 0,0002P - 0,0012$ , utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 12 no período de 21 a 22/03/00 – 31 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP.

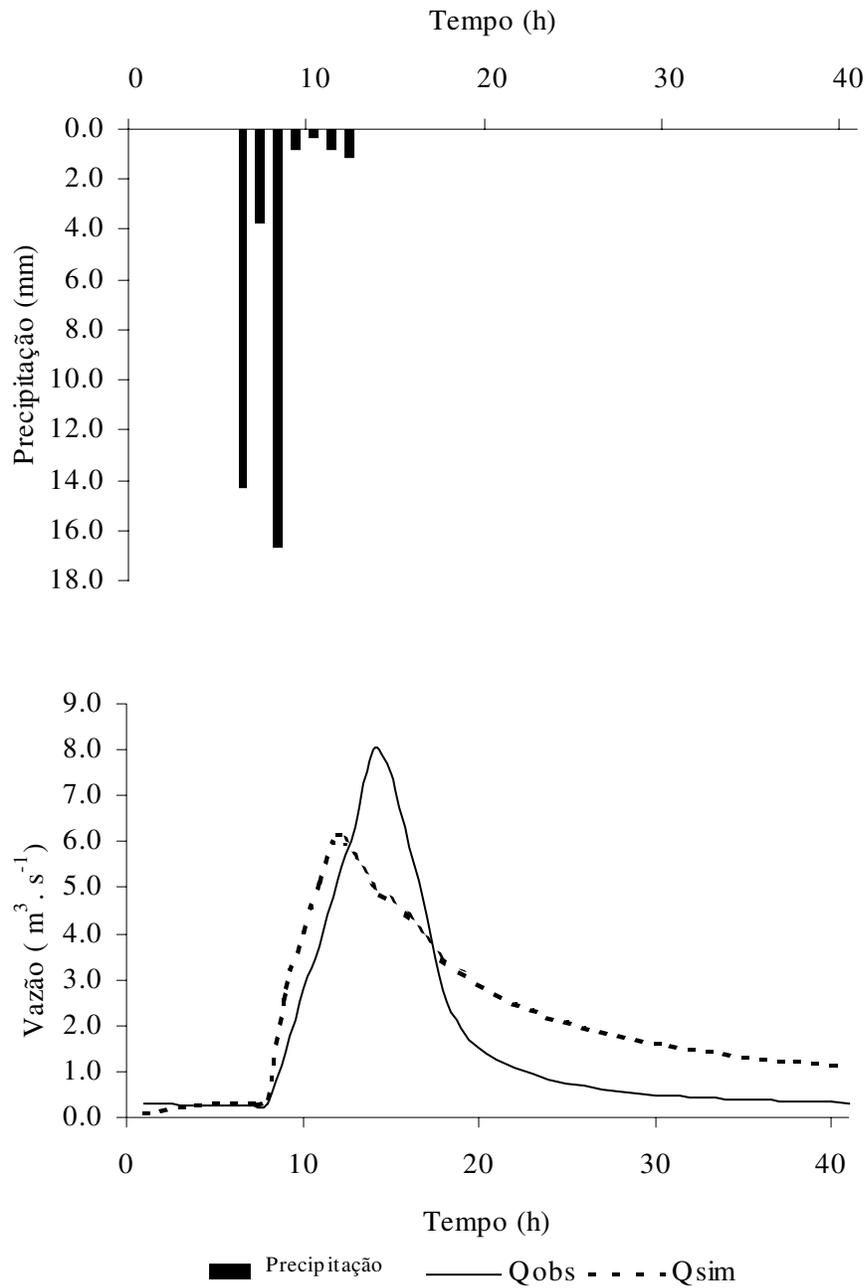


Figura C29 – Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação pela equação  $y = 0,0002P - 0,0012$ , utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 13 no período de 28 a 30/03/00 – 41 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP.

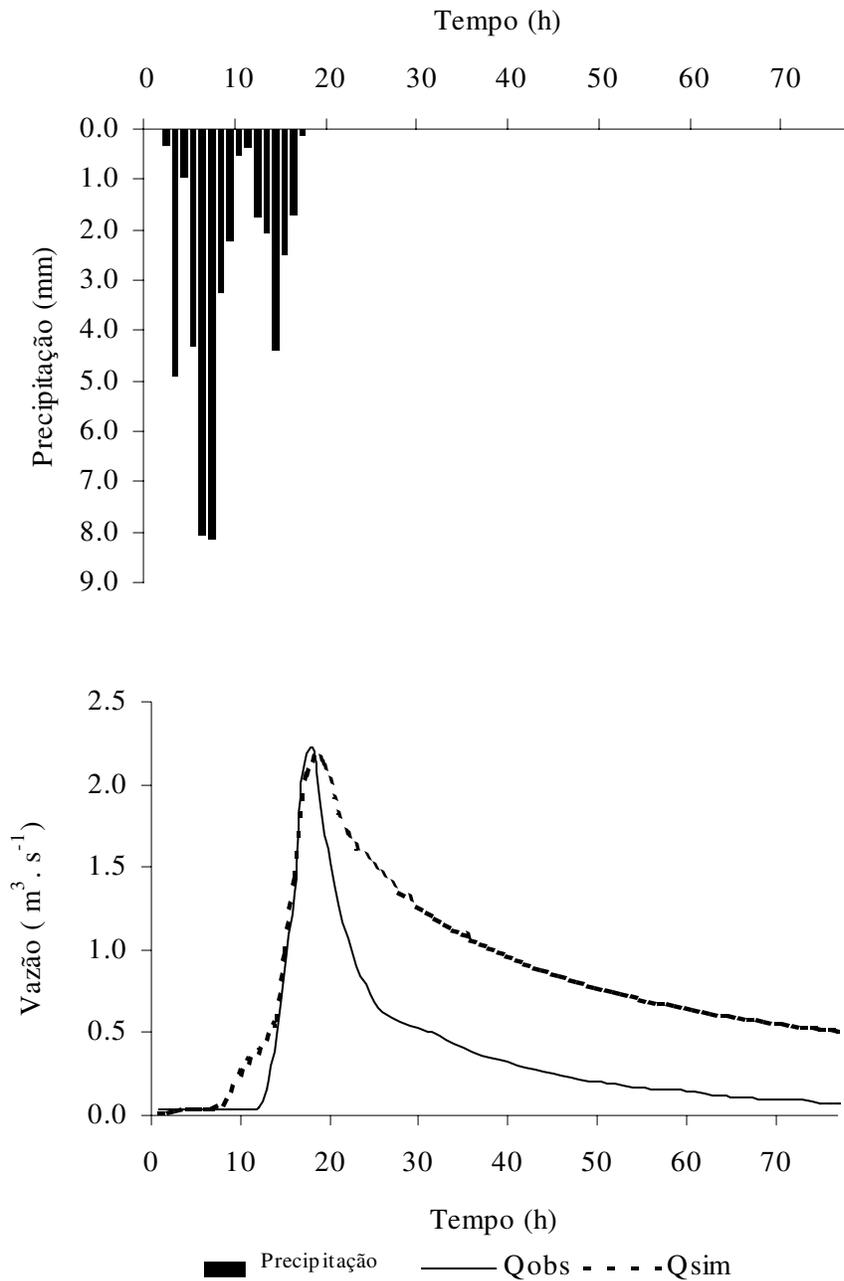


Figura C30 – Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação pela equação  $y = 0,0002P - 0,0012$ , utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 14 no período de 01 a 04/09/00 – 78 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP.

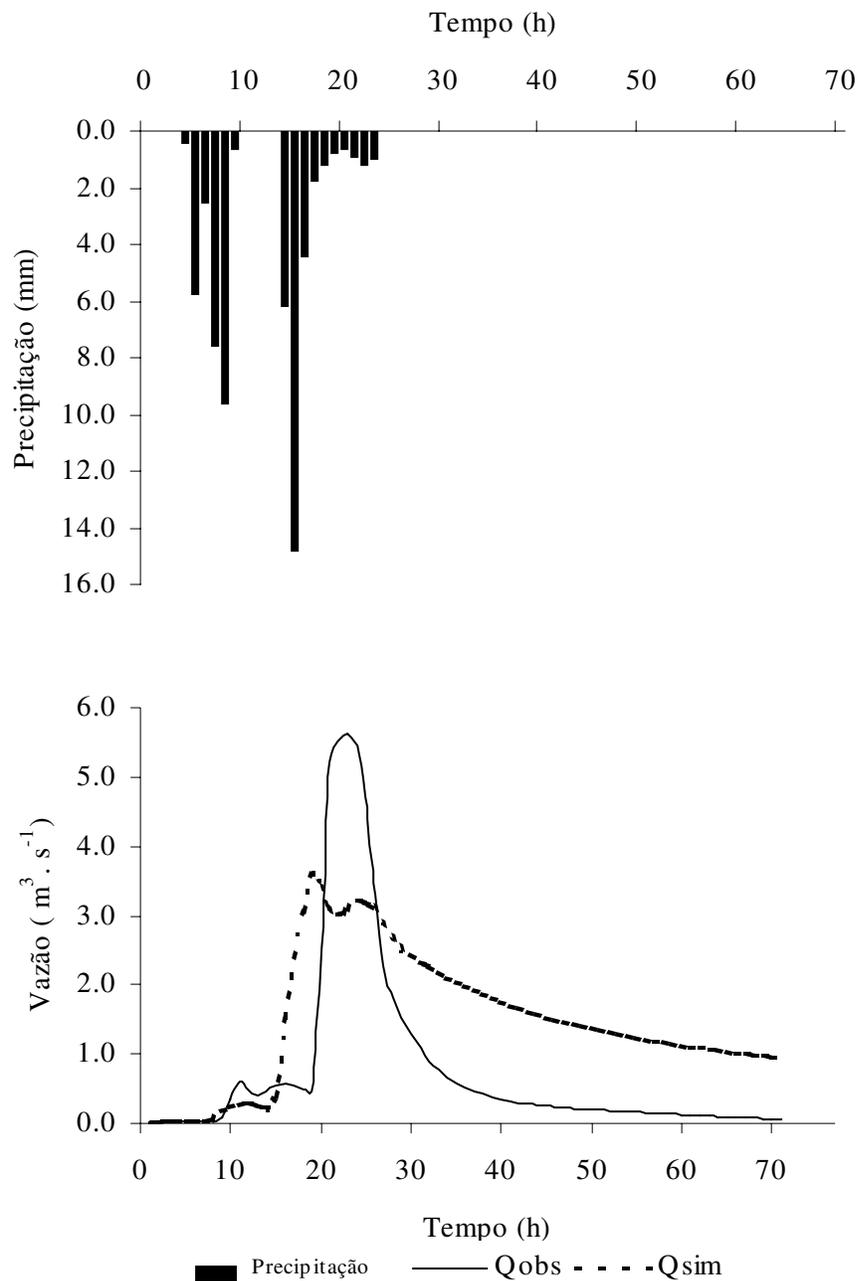


Figura C31 – Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação pela equação  $y = 0,0002P - 0,0012$ , utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 15 no período de 24 a 27/11/00 – 71 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP.

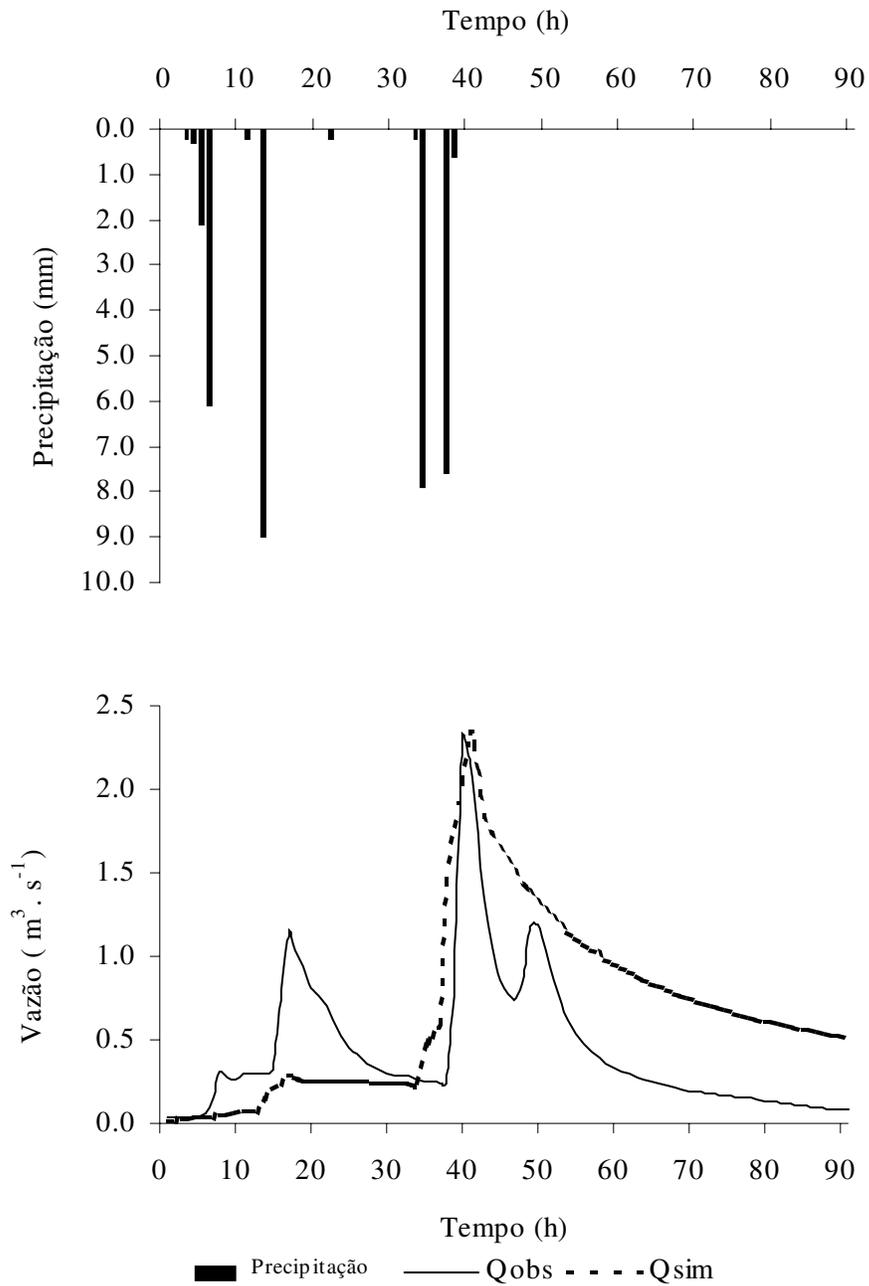


Figura C32 – Hidrogramas de vazão observada e simulada no processo de validação pela equação  $y = 0,0002P - 0,0012$ , utilizando o modelo TOPMODEL, correspondente ao Evento 16 no período de 04 a 07/12/00 – 91 h, considerando a precipitação média dos postos D4 – 116 e D4 – 118, a vazão observada no posto 4d – 006 monitorado pelo CTH/DAEE na Bacia do Ribeirão dos Marins, seção Monjolinho – Piracicaba – SP.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBOTT, M. B.; BATHURST, J. C.; CUNGE, J. A.; O'CONNELL, P. E.; RASMUSSEN, J. An introduction to the european Hydrological System – Système Hydrologique, 'SHE', 1: History and philosophy of a physically-based, distributed modelling system. **Journal of Hydrology**, v.87, p.45-59. 1986a.

ABBOTT, M. B.; BATHURST, J. C.; CUNGE, J. A.; O'CONNELL, P. E.; RASMUSSEN, J. An introduction to the european Hydrological System – Système Hydrologique, 'SHE', 2: Structure of a physically-based, distributed modelling system. **Journal of Hydrology**, v.87, p.61-77. 1986b.

ADDISCOTT, T. M.; HEYS, P. J.; WHITMORE, A. P. Application of simple leaching models in heterogeneous soils. **Geoderma**, v.38, p.185-195, 1986.

AMORIM, R. S. S. **Desprendimento e arraste de partículas de solo decorrente de chuvas simuladas**. Viçosa, 1999. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa.

ASSAD, M. L. L.; SANS, L. M. A; ASSAD, E. D.; ZULLO Jr., J. Relação entre água retida e conteúdo de areia total em solos brasileiros. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Passo Fundo, v.9, n.3, (Nº Especial: Zoneamento Agrícola), p.588-596, 2001.

BARBOSA, J.M.S.G.; BARBOSA, D.L.; ALMEIDA, M.A.; COSTA, C.F.L.; BRAGA, A.C.F.M. FIGUEIREDO, E.E. Calibração e validação do modelo SMAP para uma bacia do semi-árido da Paraíba. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE, 5., 2000, Natal. **Anais...Natal: ABRH**, 2000. CD-ROM.

BARTH, F. T. Evolução nos aspectos institucionais e no gerenciamento de recursos hídricos no Brasil. In: FREITAS, M. A. V. de; GONÇALVES, F. L., MACEDO, G. R. (Coord.). **O estado das águas no Brasil: perspectivas de gestão e informação de recursos hídricos**. Anel: Superintendência de estudos e informações hidrológicas. 2000. 1 CD-ROM.

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

BEASLEY, D. B.; HUGGINS, L.F.; MONKE, E.J. ANSWERS: a model for watershed planning. **Transactions of ASAE**, St. Joseph, v.23, p.938-944, 1980.

BEVEN, K. J. **Distributed hydrological modelling: applications of the TOPMODEL concept**. Chischester, UK. John Wiley&Sons, 1997.

BEVEN, K.; FREER, J. A dynamic TOPMODEL. **Hydrological Processes**, v.15, p. 1993-2011. 2001.

BEVEN, K. J.; *et al.* **TOPMODEL AND GRIDATB**: a user's guide to the distributions versions (95.01). 2nd ed. Lancaster: Lancaster University. 1995. 26p.

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

BEVEN, K.J.; *et al.* Testing a physically-based flood forecasting model (TOPMODEL) for three U. K. catchments. **Journal of Hydrology**, v.69, p.119-143, 1984.

BOSCH, J. M.; HEWLETT, J. D. A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. **Journal of Hydrology**, v.55, p.3-23, 1982.

BOYER, E.W.; *et al.* Overview of a simple model describing variation of dissolved organic carbon in an upland catchment. **Ecological Modelling**, v.86, p.183-188, 1996.

BRUNEAU, P.; *et al.* Sensitivity to space at time resolution of a hydrological model using digital elevation data. **Hydrological Processes**, v.9, p.69-81, 1995.

CAMPLING, P.; GOBIN, A.; BEVEN, K.; FEYEN, J. Rainfall-runoff modelling of a humid tropical catchment: the TOPMODEL approach. **Hydrological Processes**, v.16, p.231-253, 2002.

CASTRO, A.G., VALÉRIO FILHO, M. Simulação da expectativa de perdas de solo em microbacias sob diferentes manejos florestais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.21, p.419 – 426, 1997.

CEBALLOS, A.; SCHNABEL, S. Hydrological behaviour of a small catchment in the dehesa landuse system (Estremadura, SW Spain). **Journal of Hydrology**, v.210, p.146- 160, 1998.

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de Sistemas Ambientais**. São Paulo: Edgard Blucher LTDA. 2002.

COELHO, F. S. A. **Desenvolvimento de um modelo chuva-deflúvio, para pequenas bacias rurais, a partir dos modelos do hidrograma unitário instantâneo geomorfológico e do TOPMODEL**. 2003. 191p. (Tese de doutorado em Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia Civil - Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2003

COLES, N. A.; SIVAPALAN, M.; LARSEN, J. E.; LINNET, P. E.; FAHRNER, C. K. Modelling runoff generation on small agricultural catchments: can real world runoff responses be captured? In: BEVEN, K., (Eds). **Distributed hydrological modeling**: application of the TOPMODEL concept. Chichester-UK: John Wiley & Sons, 1997. p.289-314.

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, 2003. p.1-15. 2003. Disponível em: <[www.aprh.pt](http://www.aprh.pt)>. Acesso em 10 de março de 2004.

CROKE, B. F.W.; MERRIT, W. S.; JAKEMAN, A. J. A dynamic model for predicting hydrologic response to land cover changes in gauged and ungauged catchments. **Journal of Hydrology**, v.291, n.1-2, p.115-131, 2004. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science?-ob>>. Acesso em 10 de janeiro de 2004.

DECOURSEY, D. G. Mathematical models for nonpoint water pollution control. **Journal of Soil and Water Conservation**, v.40, n.5, p.408- 413, Sep/Oct 1985.

DONNELLY-MAKOWECKI, L. M.; MOORE, R. D. Hierarchical testing of three rainfall-runoff models in small forested catchments. **Journal of Hydrology**, v.219, p.136-152, 1999.

DONZELI, P. L.; VALÉRIO FILHO, M.; PINTO, S. A. F. Técnicas de sensoriamento remoto aplicadas ao diagnóstico básico para planejamento e monitoramento de microbacias hidrográficas. In: LOMBARDI NETO, F.; CAMARGO, O. A. (Eds.) **Microbacia do Córrego São Joaquim, Município de Pirassununga, SP**. Campinas: Instituto Agrônômico, 1992. 138p. (Documentos IAC, n° 29).

EASTMAN, J. R. **IDRISI – user’guide**. Worcester: Clark University, 2000.

ECKHARDT, K.; BREUER, L.; FREDE, F.G. Parameter uncertainty and the significance of simulated land use change effects. **Journal of Hydrology**, v.273, p.164-176, 2003.

ENGMAN, E. T. Roughness coefficients for routing surface runoff. Proceedings American Society Civil Engineers, **Journal Irrigation and Drainage Engineering**, v.112, p.39-53, 1986.

EWEN, J.; PARKIN, G. Validation of catchment models for predicting land-use and climate change impacts. 1. Method. **Journal of Hydrology**, v.175, p.583- 594, 1996.

FAURÈS, J. M.; *et al.* Impact of small-scale spatial rainfall variability on runoff modeling. **Journal of hydrology**, v.173, p.309-326, 1995.

FINDELING, A.; RUY, S.; SCOPEL, E. Modeling the effects of a partial residue mulch on runoff using a physically based approach. **Journal of Hydrology**, v.275, p.49-66, 2003.

FLEMMING, G. **Computer techniques in hydrology**. New York: Environmental Sciences Series Elsevier, 1977. 333p., p.70-71.

FRANCHINI, M.; *et al.* Physical interpretation and sensitivity analysis of the TOPMODEL. **Journal of Hydrology**, v.175, p.293- 338, 1996.

FUJIEDA, M.; *et al.* Hydrological processes at two subtropical forest catchments: the Serra do Mar, São Paulo, Brazil. **Journal of Hydrology**, v.196, n.1-4, p.26-46, 1997.

GOUDIE, A. **The Human Impact on the natural environment**. 4th ed. Oxford. UK: Blackwell. 1995. 454p.

HOLKO, L.; LEPISTO, A. Modelling the hydrological behaviour of a mountain catchment using TOPMODEL. **Journal of Hydrology**, v.196, p.361- 377, 1997.

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

JAKEMAN, A. J.; HORNBERGER, G. M. How much complexity is warranted in a rainfall-runoff model? **Water Resources Research**, v.29, n.8, p.2637-2649, 1993.

JAKEMAN, A. J.; LITTLEWOOD, I. G.; WHITEHEAD, P. G. Computation of the instantaneous unit hydrograph and identifiable component flow with application to two small upland catchments. **Journal of Hydrology**, v.117, p.275-300, 1990.

JENKINS, S.K.; PETERS, N.E.; RODHE, A. Hydrology. In: MOLDAN, B. CERNY, J. **Biogeochemistry of small catchments: a tool for environmental research**. Chichester: John Wiley, 1994. Cap. 2, p. 31-54.

JUNQUEIRA LOPES, R. M. E. Aspectos importantes dos mercados até ao produto final; a água. In: SIMPÓSIO DE HIDRAULICA E RECURSOS HÍDRICOS DOS PAÍSES DE LÍNGUA OFICIAL PORTUGUESA, 6, 2003, Cabo Verde, **Anais eletrônicos...** Cabo Verde, 2003. p.109-120. 2003. Disponível em: <[www.aprh.pt](http://www.aprh.pt)>. Acesso em 10 de março de 2004.

KLETECKE, R.M. **Impacto das atividades agrícolas na qualidade de água da bacia do Ribeirão dos Marins – Monjolinho – Piracicaba/SP**. 2003. 86p. (Dissertação de mestrado em Água e Solo) - Faculdade de Engenharia Agrícola - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

KIM, S.; DELLEUR, J.W. Sensitivity analysis of extended TOPMODEL for agricultural watersheds equipped with tile drains. In: BEVEN, K. **Distributed hydrological modeling: application of the TOPMODEL concept**. Chichester-UK: John Wiley & Sons, 1997. p.161-179.

KUO, W. L.; *et al.* Effect of grid size on runoff and soil moisture for a variable-source-area hydrology model. **Water Resources Research**, v.35, n.11, p.3419- 3428, 1999.

LANE, L. J.; NEARING, M. A. **Water Erosion Prediction Project: hillslope profile model documentation**. 2.ed. West Lafayette: USDA-ARS – National Soil Erosion Research Laboratory, 1989. (NS ERL report, 2)

LIMA, W. P. **Impacto ambiental do eucalipto**. São Paulo: EDUSP, 1993. 301p.

LIMA, W. P. **Princípios de hidrologia florestal para o manejo de bacias hidrográficas**. Piracicaba: ESALQ/USP. 1986. 241p.

LIMA, W. P.; ZAKIA, M. J. B. Indicadores hidrológicos em áreas florestais. **Série técnica IPEF**, n.31, abr., 1998.

LOPES, J. E. G.; *et al.* SMAP, a simplified hydrologic model. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON RAINFALL-RUNOFF MODELING, 1981, Mississipi. Proceedings...Mississipi: State University Mississipi, 1981 apud BARBOSA, J.M.S.G., *et al.* Simulação Hidrológica: aplicações de um modelo simplificado. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE HIDROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS, 4. Fortaleza.. **Anais...**, Fortaleza: ABRH, 1981. v.2.

LOVEJOY, S. B.; *et al.* Research needs for water quality management in the 21<sup>st</sup> century: A spatial decision support system. **Journal and Water Conservation**, v.52, n.1, p.18- 22, 1997.

MACHADO, R. E. **Simulação de escoamento e de produção de sedimentos em uma microbacia hidrográfica utilizando técnicas de modelagem e geoprocessamento.** 2002. 154p. (Tese de Doutorado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2002.

MINE, M.R.M.; CLARKE, R. T. O uso do TOPMODEL em condições brasileiras: resultado preliminar. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.1, n.2, p.89-105, 1996.

MOHAMMED, A.; GUMBS, F. A. The effect of plant spacing on water runoff, soil erosion and yield of maize (*Zea mays* L.) on a steep slope of na ultisol in Trinidad. **Journal Agricultural Engineer Research**, Silsoe, v.27, n.6, p.481-488, 1982.

MOLICOVÁ, H.; *et al.* Using TOPMODEL towards identifying and modelling the hydrological patterns within a headwater, humid, tropical catchment. In: BEVEN, K. **Distributed hydrological modeling: application of the TOPMODEL concept.** Chichester-UK: John Wiley & Sons, 1997. p.57-84.

MOORE, I. D., NORTON, T. W.; WILLIAMS, J. E. Modelling environmental heterogeneity in forested landscape. **Journal of Hydrology**, n.150, p.717-747, 1993.

MORETTI, L. R. **Avaliação da erosão superficial em pequenas bacias hidrográficas rurais.** 2001. 127p. (Tese de Doutorado em Engenharia) - Escola Politécnica/USP, São Paulo, 2001.

OLIVEIRA, J. B. de; *et al.* **Mapa Pedológico do Estado de São Paulo:** legenda expandida. Campinas: Instituto Agrônômico; Rio de Janeiro: Embrapa-Solos, 1999. 64p.: mapa

OLIVEIRA, J. B. de; PRADO, H. **Levantamento pedológico semidetalhado do Estado de São Paulo:** quadrícula de Piracicaba. II. Memorial descritivo. Campinas: Instituto Agrônômico, 1987. 133p. (Boletim Científico,)

O'LOUGHLIN, E.M. Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis. **Water Resources Research**, v.22, n.5, p.794-804, 1986.

O'LOUGHLIN, E.M., SHORT, D.L.; DAWES, W.R. Modelling the hydrological response of catchments to landuse change. In: **Proceedings of the 1989 AUSTRALIAN INSTITUTION OF ENGINEERS HYDROLOGY AND WATER RESOURCES SYMPOSIUM**, 1989. **Proceedings...** Nat. Conf. Publ., 1989. No. 89/19, p. 335-340.

PARKIN, G.; O'DONNELL, G.; EWEN, J.; BATHURST, J. C.; O'CONNELL, P. E.; LAVABRE, J. Validation of catchment models for predicting land-use and climate change impacts. 2. Case study for a Mediterranean catchment. **Journal of Hydrology**, v.175, p. 595-613, 1996.

PEKÁROVÁ, P. & PEKÁR, J. The impact of land use on stream water quality in Slovakia. **Journal of Hydrology**, v.180, p.333-350, 1996.

PEREIRA, A. R.; ANGELOCCI, L. R.; SENTELHAS, P. C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba-RS: Livraria e Editora Agropecuária Ltda. 2002. 478p.

PEREIRA, L. C. **Aptidão agrícola das terras e sensibilidade ambiental: proposta metodológica**. 2002. (Tese de Doutorado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola - Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2002.

PLANO de bacia hidrográfica 2000 – 2003: síntese do relatório final. [Piracicaba]: Comitê das Bacias Hidrográficas dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí, [2003]. 61p.

POZZEBON, E.J.; *et al.* Simulações do escoamento direto em uma microbacia hidrográfica, para diferentes cenários, por meio de sistemas de informações geográficas e de modelagem hidrológica. **Engenharia Rural**, v.11, n.2, p.50-66, dez. 2000.

PUTTY, M. R. Y.; PRASAD, R. Understanding runoff processes using a watershed model – a case study in the Western Ghats in South India. **Journal of Hydrology**, v.228, p.215- 227, 2000.

QUINN, P.; *et al.* The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modeling using digital terrain models. **Hydrological Processes**, v.5, p.59-79, 1991.

QUINN, P.F.; BEVEN. K.J.; LAMB, R. The  $\ln(a/\tan\beta)$  index: how to calculate it and how to use it in TOPMODEL framework. **Hydrological Process**, n.9, p.161-182, 1995.

RAMOS, C. M. A água – fonte de cooperação de conflitos. In: SIMPÓSIO DE HIDRAULICA E RECURSOS HÍDRICOS DOS PAÍSES DE LÍNGUA OFICIAL PORTUGUESA, 6, 2003, Cabo Verde, **Anais eletrônicos...** Cabo Verde, 2003. p.17-30. 2003. Disponível em: <[www.aprh.pt](http://www.aprh.pt)>. Acesso em 10 de março de 2004.

RANIERI, S. B. L. **Avaliação de métodos e escalas de trabalho para a determinação de risco de erosão em bacia hidrográfica utilizando sistema de informações geográficas**

(SIG). 1996. 128p. (Dissertação de Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental). Escola de Engenharia de São Carlos –USP, São Carlos, 1996.

RANZINI, M. **Modelagem hidrológica de uma microbacia florestada da Serra do Mar, SP, com o modelo TOPMODEL** – simulação do comportamento hidrológico em função do corte raso. 2002. 116p. (Tese de Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Escola de Engenharia de São Carlos –USP, São Carlos, 2002.

RAWLS, W. J.; BRAKENSIEK, D. L. Prediction of soil properties for hydrologic modeling. In: JONES, E. B.; WARD, T. J. (Ed.) **Watershed management in the 80's**. New York: ASCE, 1985. Cap 13, p.293-299.

RENNÓ, C. D.; SOARES, J. V. Uso do índice topográfico como estimador da profundidade do lençol freático. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11., 2003, Belo Horizonte. **Anais...**São José dos Campos: INPE, 2003. p. 2579-2588. 1 CD-ROM.

RODHE, A.; SEIBERT, J. Wetland occurrence in relation to topography: a test of topographic índices as moisture indicators. **Agricultural and Forest Metereology**, v. 98-99, p. 325-340, 1999.

ROMANO, P. Política para a gestão de recursos hídricos. In: SILVA, D. D.; PRUSKI, F. F. **Recursos hídricos e desenvolvimento sustentável da agricultura: programa de suporte técnico à gestão dos recursos hídricos**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente. 1997. p.1-13.

ROMANOWICZ, R. A MATLAB implementation of TOPMODEL. In: BEVEN, K. J. **Distributed hydrological modelling: applications of the TOPMODEL concept**. Chischester, UK: John Wiley&Sons. 1997.p.107-122.

SANTOS, I. **Modelagem geobiohidrológica como ferramenta no planejamento ambiental: estudo da bacia hidrográfica do rio Pequeno, São José dos Pinhais – PR**. 2001. 93p. (Dissertação de Mestrado em Agronomia). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2001.

SANTOS, M. **DXFCON v.2.0, conversor de dados planialtimétricos (AUTOCAD–SURFER)**. Campinas: FEAGRI-UNICAMP, 1998.

SAULNIER, G. M. **Information pedologique spatialisée et traitements topographiques améliorés dans la modélisation hydrologique par TOPMODEL**. 1996. 340p. (Tese de Doutorado) Institut National Polytechnique de Grenoble, Grenoble, 1996.

SAULNIER, G. M.; BEVEN, K.; OBLED, C. Including spatially variable effective soil depths in TOPMODEL. **Journal of Hydrology**, v.202, p.158-172, 1997.

SCALON, T. M.; *et al.* Shallow subsurface storm flow in a forested headwater catchment: Observations and modeling using a modified TOPMODEL. **Water Resources Research**, v. 36, n. 9, p. 2575 - 2586, Set. 2000.

SCHULER, A. E. **Aplicação do TOPMODEL em uma bacia de mesoescala localizada na cabeceira do Rio Corumbataí.**, 1998. 130p. (Dissertação de Mestrado Ciências da Engenharia Ambiental). Escola de Engenharia de São Carlos-USP, São Carlos, 1998.

SCHULER, A. E.; *et al.* Análise da representatividade física dos parâmetros do TOPMODEL em uma bacia de meso escala localizada nas cabeceiras do rio Corumbataí, São Paulo. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.5, n.2, p.5-25, 2000.

SELBY, M.J. Hillslope materials and processes. Oxford: Oxford University Press. 1993. 451p apud RANZINI, M. **Modelagem hidrológica de uma microbacia florestada da Serra do Mar, SP, com o modelo TOPMODEL** – simulação do comportamento hidrológico em função do corte raso. 2002. 116p. (Tese de Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental) - Escola de Engenharia de São Carlos –USP, São Carlos, 2002.

SENARATH, S. U. S.; *et al.* On the calibration and verification of two-dimensional, distributed, Hortonian, continuous watershed models. **Water Resources Research**, v.36, n.6, p.1495 - 1510, Jun. 2000.

SETTI, A. A.; *et al.* **Introdução ao gerenciamento de recursos hídricos**. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica; Agência Nacional de Águas, 2001. 328p. il.

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: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, v.21, n.1, p.12 – 20, jan. 2001.

SILVEIRA, A.L.L. Ciclo hidrológico e bacia hidrográfica. In: TUCCI, C.E.M. **Hidrologia – ciência e aplicação**. Porto Alegre: UFRGS. 1993. Cap.2, p.35–51.

SIVAPALAN, M.; WOODS, R. A.; KALMA, J. D. Variable bucket representation of TOPMODEL and investigation of the effects of rainfall heterogeneity. **Hydrological Processes**, v.11, p.1307-1330, 1997.

SOUZA, J. L. **Medida e estimativa do escoamento superficial da água da chuva em solo cultivado com soja e trigo, em rotação, sob diferentes sistemas de manejo**. 1991. 111p. (Tese de Doutorado) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, UNESP, Botucatu, 1991

SZILAGYI, J.; PARLANGE, M. B. A geomorphology – based semi-distributed watershed model. **Advances in Water Resources**, v. 23, p. 177- 187, 1999.

TERAMOTO, E. R. **Relações solo, substrato geológico e superfícies geomórficas na microbacia do Ribeirão Marins**. 1995. 93p. (Dissertação de Mestrado em Agronomia) Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, USP, Piracicaba, 1995.

THOMPSON, J. C.; MOORE, R. D. Relations between topography and water table depth in a shallow forest soil. **Hydrological Processes**, v.10, p.1513-1525, 1996.

- TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 1998, 669p.
- TUCCI, C. E. M. **Oportunidades de ciência e tecnologia em recursos hídricos**. Disponível em: <<http://www.met.gov.br/CEE/revista/Parcerias11/07tucci.pdf>>. Acesso em 20 de fevereiro de 2004.
- TUNDISI, J. G. Ciclo hidrológico e gerenciamento integrado. **Ciência e Cultura**, v.55, n.4, p.31-33, 2003.
- UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. Projeto Piracena. Piracicaba: CENA, [1997]. Disponível em: <<http://www.cena.usp.br/piracena>>. Acesso em 20 de outubro de 2002).
- VAN HERPE, Y.; Troch, P. A.; Callewier, L.; Quinn, P. F. Application of a conceptual catchment scale nitrate transport model on two rural river basins. **Environmental Pollution**, v.102, S1, p.596-577, 1998.
- VARELLA, R. F.; CAMPANA, N. A. Simulação matemática do processo de transformação de chuva em vazão: estudo do modelo TOPMODEL. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v.5, n.4, p.121-139, 2000.
- VERTESSY, R.A., *et al.* Predicting water yield from a mountain ash forest catchment using a terrain analysis based catchment model. **Journal of Hydrology**, v.150, p.665-700, 1993.
- WISCHMEIER, W.H.; SMITH, D.D. **Predicting rainfall erosion e losses – a guide of conservation planning**. Washington: USDA, 1978. (Agricultural Handbook, 537).
- ZAKIA, M. J. B. **Identificação e caracterização da zona ripária em uma microbacia experimental**: implicações no manejo de bacias hidrográficas e na recomposição de florestas. 1998. 100p. (Tese de Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental). Escola de Engenharia de São Carlos – USP, São Carlos, 1998.
- ZHANG, W.; MONTGOMERY, D. R. Digital elevation model grid size, landscape representation, and hydrologic simulations. **Water Resources Research**, v.30, n.4, p. 1019-1028, 1994.