

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA DE UMA BACIA RURAL  
UTILIZANDO O MODELO TOPMODEL ACOPLADO  
A UM MODELO DE INTERCEPTAÇÃO DE CHUVA PELA  
COBERTURA VEGETAL**

CAMILA PRAZERES GONÇALVES DE CASTILHO

CAMPINAS  
FEVEREIRO DE 2005

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA DE UMA BACIA RURAL  
UTILIZANDO O MODELO TOPMODEL ACOPLADO  
A UM MODELO DE INTERCEPTAÇÃO DE CHUVA PELA  
COBERTURA VEGETAL**

Tese de Doutorado submetida à banca  
examinadora para obtenção do título de Doutora  
em Engenharia, na área de concentração Água e  
Solo.

CAMILA PRAZERES GONÇALVES DE CASTILHO

Orientador: Prof. Dr. José Teixeira Filho

CAMPINAS  
FEVEREIRO DE 2005

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

C278s Castilho, Camila Prazeres Gonçalves de  
Simulação hidrológica de uma bacia rural utilizando o  
modelo TOPMODEL acoplado a um modelo de  
interceptação de chuva pela cobertura vegetal / Camila  
Prazeres Gonçalves de Castilho. --Campinas, SP: [s.n.],  
2005.

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

1. Hidrologia - modelos. 2. Bacia hidrográfica. 3.  
Cana-de-açúcar. 4. Evaporação. 5. Previsão de vazões.  
I. Teixeira Filho, José. II. Universidade Estadual de  
Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. III.  
Título.

Título em Inglês: Hydrological simulation of a rural basin using the  
TOPMODEL coupled to a model of rainfall interception by  
vegetation

Palavras-chave em Inglês: Watershed, Sugarcane, Evaporation, Estimates of  
flow

Área de concentração: Água e Solo

Titulação: Doutor em Engenharia Agrícola

Banca examinadora: Walter de Paula Lima, Maurício Ranzini, Antonio Carlos  
Zuffo, Denis Miguel Roston

Data da defesa: 25/02/2005

Programa de Pós Graduação: Engenharia Agrícola

“Se eu enxerguei um pouco mais além do que outro  
homem, foi porque subi em ombros de gigantes.”

Isaac Newton

*Ao meu avô José (in memoriam),*

*Dedico.*

*Aos meus amores, Renato e Gabriel,*

*Ofereço.*

## AGRADECIMENTOS

A Deus, presença constante em minha vida.

Aos meus pais, Sebastião e Maria Alice; ao meu esposo e ao meu filho; à minha irmãzinha Carol; às tias Cuca e Tereca e à minha avó, pelo apoio, incentivo, ajuda, carinho e compreensão.

Ao Prof. José Teixeira, pela orientação, incentivo e confiança.

À Dra. Maria José Brito Zakia, sempre disposta a ajudar, pela colaboração.

Ao Dr. Maurício Ranzini, pela disposição, ajuda e esclarecimentos.

Ao técnico do Laboratório de Hidrologia, Sérgio Lopes, pelo apoio em campo.

Ao Sr. Robison Orsini, pela atenção e desenhos realizados.

À Suzely Francisco e Vanessa Stael Pelá (Secretaria de Atendimento Multiusuário), pela atenção e suporte.

À Ana Paula Montanher, Marta Vechi e Rosangela Gomes (Secretaria de Pós Graduação), pelo suporte administrativo.

À Faculdade de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realizar o curso.

À Lucia, amiga e companheira de “sufoco”, por toda ajuda (ao vivo e direto de Lavras) e apoio.

À minha prima Alessandra, pela disposição em ajudar nas intermináveis traduções.

Aos amigos, companheiros de trabalho e diversão, Ariston, Aristóteles, Carlos, Celso, Christiane, Jane, Luciana, Marcão, Maria Tereza, Rojane, Teresinha, Tereza, pelo apoio, pelos bons momentos e por toda ajuda.

Aos amigos, Nadia, Sara e Ricardo, que mesmo à distância, foram fontes de apoio e incentivo.

Ao Conselho Nacional de Pesquisa, pela concessão da bolsa de estudos.

A todos aqueles que, direta ou indiretamente, colaboraram para realização deste trabalho.

# SUMÁRIO

<b>LISTA DE FIGURAS</b>	<b>ix</b>
<b>LISTA DE QUADROS</b>	<b>xxi</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b>	<b>xxii</b>
<b>RESUMO</b>	<b>xxiv</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>xxv</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVOS</b>	<b>4</b>
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>5</b>
<b>3.1. MODELAGEM HIDROLÓGICA</b>	5
3.1.1. MODELOS PRECIPITAÇÃO–VAZÃO	11
3.1.2. MODELOS DISTRIBUÍDOS	14
<b>3.2. TOPMODEL</b>	18
3.2.1. CONCEITUAÇÃO	18
3.2.2. TEORIA	20
3.2.3. ESTUDOS E APLICAÇÕES	26
<b>3.3. INTERCEPTAÇÃO VEGETAL</b>	53
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>63</b>
<b>4.1. MUNICÍPIO DE LIMEIRA</b>	63
<b>4.2. BACIA HIDROGRÁFICA DO ESTUDO</b>	64
4.2.1. LOCALIZAÇÃO	64
4.2.2. ACESSO	64
4.2.3. ESCOLHA DA BACIA PARA O ESTUDO	64
4.2.4. GEOMORFOLOGIA	64
4.2.5. CLIMA	64
4.2.6. VEGETAÇÃO	65
4.2.7. SOLOS	65
4.2.8. MODELO NUMÉRICO DO TERRENO	65
4.2.9. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA	67
4.2.9.1. Altitudes	67
4.2.9.2. Orientação dos terrenos	67
4.2.9.3. Inclinação dos terrenos	67
4.2.9.4. Solos	69
4.2.9.5. Uso e ocupação do solo	69
<b>4.3. DADOS COLETADOS</b>	72

4.3.1. DADOS DE PRECIPITAÇÃO	72
4.3.2. DADOS DE VAZÃO	72
4.3.3. PERÍODO DE DADOS	73
<b>4.4. MODELAGEM</b>	<b>74</b>
4.4.1. MODELO TOPMODEL	74
4.4.1.2. Escolha dos eventos	74
4.4.1.3. Versão do modelo	74
4.4.1.4. Dados de entrada	75
4.4.1.4.1. Índice Topográfico	75
4.4.1.4.1.1. Modelo numérico de terreno (MNT)	75
4.4.1.4.2. Dados de precipitação	75
4.4.1.4.3. Dados de Evapotranspiração	75
4.4.1.4.4. Vazão observada	75
4.4.1.4.5. Parâmetros do modelo	75
4.4.2. SIMULAÇÕES	76
4.4.2.1. Aplicação do modelo TOPMODEL	76
4.4.2.1.1. Calibração do Modelo	76
4.4.2.1.1.1. Eventos	76
4.4.2.1.1.2. Ajuste dos parâmetros	76
4.4.2.1.2. Validação do modelo	77
4.4.2.1.2.1. Eventos	77
4.4.2.1.2.2. Ajuste dos parâmetros	77
4.4.2.2. Aplic. do modelo TOPMODEL com um modelo de interceptação de chuva pela vegetação	77
4.4.2.2.1. Modelo de Interceptação de Chuva	78
4.4.2.2.1.1. Índice de Área Foliar	78
4.4.2.2.1.2. Interceptação vegetal	78
4.4.2.2.1.3. Escoamento pelo tronco	79
4.4.2.2.2. Calibração do Modelo	80
4.4.2.2.2.1. Eventos	80
4.4.2.2.2.2. Ajuste dos parâmetros	80
4.4.2.2.3. Validação do modelo	80
4.4.2.2.3.1. Eventos	80
4.4.2.2.3.2. Ajuste dos parâmetros	80

---

## **5. RESULTADOS** **81**

<b>5.1. MODELAGEM</b>	<b>81</b>
5.1.1. MODELO TOPMODEL	81
5.1.1.1. Eventos analisados	81
5.1.1.2. Índice Topográfico	82
5.1.2. SIMULAÇÕES	83
5.1.2.1. Aplicação do modelo TOPMODEL	83
5.1.2.1.1. Calibração do modelo	83
5.1.2.1.1.1. Eventos	83
5.1.2.1.1.2. Ajuste dos parâmetros	83
5.1.2.1.1.3. Resultados	85
5.1.2.1.2. Validação do modelo	94
5.1.2.1.2.1. Eventos	94
5.1.2.1.2.2. Ajuste dos parâmetros	94
5.1.2.1.2.3. Resultados	95

5.1.2.2. Aplicação do modelo TOPMODEL em conjunto a um modelo de interceptação vegetal	110
5.1.2.2.1. Modelo de Interceptação Vegetal	110
5.1.2.2.1.1. Índice de Área Foliar	110
5.1.2.2.1.2. Escoamento pelo colmo	111
5.1.2.2.1.3. Eventos de calibração	111
5.1.2.2.1.3.1. Interceptação Vegetal	111
5.1.2.2.1.3.2. Escoamento pelo colmo	111
5.1.2.2.1.3.4. Ajustes dos parâmetros	112
5.1.2.2.1.3.4.1. Ajustes dos parâmetros considerando a hipótese H1 de distribuição da precipitação interceptada	112
5.1.2.2.1.3.4.2. Ajustes dos parâmetros considerando a hipótese H2 de distribuição da precipitação interceptada	113
5.1.2.2.1.3.5. Resultados	114
5.1.2.2.1.3.5.1. Resultados considerando a hipótese H1 de distribuição da precipitação interceptada	114
5.1.2.2.1.3.5.2. Resultados considerando a hipótese H2 de distribuição da precipitação interceptada	123
5.1.2.2.1.4. Eventos de validação	132
5.1.2.2.1.4.1. Interceptação Vegetal	132
5.1.2.2.1.4.2. Escoamento pelo colmo	132
5.1.2.2.1.4.3. Ajustes dos parâmetros	134
5.1.2.2.1.4.3.1. Ajustes dos parâmetros considerando a hipótese H1 de distribuição da precipitação interceptada	134
5.1.2.2.1.4.3.2. Ajustes dos parâmetros considerando a hipótese H2 de distribuição da precipitação interceptada	134
5.1.2.2.1.4.4. Resultados	135
5.1.2.2.1.4.4.1. Resultados considerando a hipótese H1 de distribuição da precipitação interceptada	135
5.1.2.2.1.4.4.2. Resultados considerando a hipótese H2 de distribuição da precipitação interceptada	149

---

## **6. DISCUSSÃO** **163**

<b>6.1. MODELAGEM</b>	<b>163</b>
6.1.1. MODELO TOPMODEL	163
6.1.1.1. Comparação com estudos realizados no Brasil	163
6.1.1.2. Índice Topográfico	163
6.1.2. SIMULAÇÕES	164
6.1.2.1. Aplicação do modelo TOPMODEL	164
6.1.2.1.1. Calibração do modelo	164
6.1.2.1.1.1. Eventos	164
6.1.2.1.1.2. Ajuste dos parâmetros	164
6.1.2.1.1.3. RESULTADOS	168
6.1.2.1.2. Validação do modelo	172
6.1.2.1.2.1. Eventos	172
6.1.2.1.2.2. Ajuste dos parâmetros	172
6.1.2.1.2.3. Resultados	173
6.1.2.2. Aplicação do modelo TOPMODEL em conjunto a um modelo de interceptação vegetal	177
6.1.2.2.1.1. Índice de Área Foliar	177
6.1.2.2.1.2. Eventos de calibração	178
6.1.2.2.1.2.1. Interceptação Vegetal	178
6.1.2.2.1.2.2. Escoamento pelo colmo	178
6.1.2.2.1.2.3. Precipitação que chega ao solo	178
6.1.2.2.1.2.4. Ajuste dos parâmetros	178



6.1.2.2.1.2.4.1. Ajuste dos parâmetros considerando a hipótese H1 de distribuição da precipitação interceptada	178
6.1.2.2.1.2.4.2. Ajuste dos parâmetros considerando a hipótese H2 de distribuição da precipitação interceptada	179
6.1.2.2.1.2.5. Resultados	179
6.1.2.2.1.2.5.1. Resultados considerando a hipótese H1 de distribuição da precipitação interceptada	179
6.1.2.2.1.2.5.2. Resultados considerando a hipótese H2 de distribuição da precipitação interceptada	181
6.1.2.2.1.3. Eventos de validação	182
6.1.2.2.1.3.1. Interceptação Vegetal	182
6.1.2.2.1.3.2. Escoamento pelo colmo	182
6.1.2.2.1.3.3. Precipitação que chega ao solo	182
6.1.2.2.1.3.4. Ajuste dos parâmetros	183
6.1.2.2.1.3.4.1. Ajuste dos parâmetros considerando a hipótese H1 de distribuição da precipitação interceptada	183
6.1.2.2.1.3.4.2. Ajuste dos parâmetros considerando a hipótese H2 de distribuição da precipitação interceptada	183
6.1.2.2.1.3.5. Resultados	184
6.1.2.2.1.3.5.1. Resultados considerando a hipótese H1 de distribuição da precipitação interceptada	184
6.1.2.2.1.3.5.2. Resultados considerando a hipótese H2 de distribuição da precipitação interceptada	186

## **7. CONCLUSÃO** **187**

## **8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS** **189**

## **9. APÊNDICES** **199**

<b>APÊNDICE A – APLICAÇÃO DO MODELO TOPMODEL</b>	200
APÊNDICE A.1 – APLICAÇÃO DO MODELO TOPMODEL – EVENTOS DE CALIBRAÇÃO	201
APÊNDICE A.2 – APLICAÇÃO DO MODELO TOPMODEL – EVENTOS DE VALIDAÇÃO	207
APÊNDICE B – APLICAÇÃO DO MODELO TOPMODEL EM CONJUNTO A UM MODELO DE INTERCEPTAÇÃO VEGETAL	218
APÊNDICE B.1 – APLICAÇÃO DO MODELO TOPMODEL EM CONJUNTO A UM MODELO DE INTERCEPTAÇÃO VEGETAL CONSIDERANDO A HIPÓTESE H1 DE DISTRIBUIÇÃO DA INTERCEPTAÇÃO	219
APÊNDICE B.1.1 – Aplicação do modelo TOPMODEL em conjunto a um modelo de interceptação vegetal considerando a hipótese H1 de distribuição da interceptação – Eventos de calibração	220
APÊNDICE B.1.2 – Aplicação do modelo TOPMODEL em conjunto com um modelo de interceptação vegetal considerando a hipótese H1 de distribuição da interceptação - Eventos de validação	226
APÊNDICE B.2 – APLICAÇÃO DO MODELO TOPMODEL EM CONJUNTO A UM MODELO DE INTERCEPTAÇÃO VEGETAL CONSIDERANDO A HIPÓTESE H2 DE DISTRIBUIÇÃO DA INTERCEPTAÇÃO	237
APÊNDICE B.2.1 – Aplicação do modelo TOPMODEL em conjunto a um modelo de interceptação vegetal considerando a hipótese H2 de distribuição da interceptação – Eventos de calibração	238
APÊNDICE B.2.2 – Aplicação do modelo TOPMODEL em conjunto com um modelo de interceptação vegetal considerando a hipótese H2 de distribuição da interceptação - Eventos de validação	244

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Diagrama esquemático do conceito do TOPMODEL e características da discretização do modelo (Fonte: Adaptado de TUCCI, 1998 e SANTOS, 2001).....	19
Figura 2 - Balanço hídrico de um segmento de encosta da bacia hidrográfica (Fonte: SANTOS, 2001). .....	20
Figura 3 – Representação esquemática dos armazenamentos de água no perfil do solo (Fonte: Adaptado de TUCCI, 1998).....	23
Figura 4 – Modelo Numérico do Terreno, resolução 10m x 10m (Fonte: HEIN, 2000; HEIN). Dados originais obtidos de carta planialtimétrica do Instituto Geográfico e Geológico de São Paulo, escala 1:10.000. ....	66
Figura 5 – Modelo Numérico do Terreno em 3 dimensões da região do reservatório do Tatu e da bacia em estudo (divisor de águas – linha branca), resolução 10m x 10m (Fonte: HEIN, 2000; HEIN). Dados originais obtidos de carta planialtimétrica do Instituto Geográfico e Geológico de São Paulo, escala 1:10.000. ....	66
Figura 6 - Carta de altitudes, resolução 10m x 10m da bacia em estudo (Fonte: HEIN, 2000; HEIN e TEIXEIRA FILHO, 2000). Dados originais obtidos de carta planialtimétrica do Instituto Geográfico e Geológico de São Paulo, escala 1:10.000. ....	67
Figura 7 - Carta de orientação dos terrenos, resolução 10m x 10m da bacia em estudo (Fonte: HEIN, 2000; HEIN e TEIXEIRA FILHO, 2000). Dados originais obtidos de carta planialtimétrica do Instituto Geográfico e Geológico de São Paulo, escala 1:10.000. ....	68
Figura 8 - Carta de inclinação dos terrenos, resolução 10m x 10m da bacia em estudo (Fonte: HEIN, 2000; HEIN e TEIXEIRA FILHO, 2000). Dados originais obtidos de carta planialtimétrica do Instituto Geográfico e Geológico de São Paulo, escala 1:10.000. ....	68
Figura 9 - Carta de solos, resolução 10m x 10m da bacia em estudo (Fonte: HEIN, 2000; HEIN e TEIXEIRA FILHO, 2000). Dados originais obtidos de carta planialtimétrica do Instituto Geográfico e Geológico de São Paulo, escala 1:10.000. ....	69
Figura 10 – Carta de uso do solo – 1978, resolução 10m x 10m (Fonte: HEIN, 2000; HEIN e TEIXEIRA FILHO, 2000). Dados originais obtidos de fotografia aérea, escala 1:30.000.....	70
Figura 11 – Carta de uso do solo – 1988, resolução 10m x 10m (Fonte: HEIN, 2000; HEIN e TEIXEIRA FILHO, 2000). Dados originais obtidos de fotografia aérea, escala 1:30.000.....	70
Figura 12 – Carta de uso do solo – 1998, resolução 10m x 10m (Fonte: HEIN, 2000; HEIN e TEIXEIRA FILHO, 2000). Dados originais obtidos de fotografia aérea, escala 1:30.000.....	71
Figura 15 – Gráfico de altura da lâmina de água (h) versus vazão (Q) para determinação da curva chave (Fonte: MARTINS, 2001). .....	73
Figura 16 – Padrão espacial da distribuição do índice topográfico na bacia.....	82
Figura 17 – Distribuição da frequência relativa do índice topográfico na bacia.....	82
Figura 18 – Variação da vazão máxima observada e simulada para os eventos de calibração .	86
Figura 19 – Variação do volume escoado observado e simulado para os eventos de calibração .....	86
Figura 20 – Vazão horária observada versus vazão horária simulada para os eventos de calibração do TOPMODEL na bacia e modelo de regressão linear entre os valores.....	87
Figura 21 – Volume escoado observado versus volume escoado simulado para os eventos de calibração do TOPMODEL na bacia e modelo de regressão linear entre os valores.....	87
Figura 22 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 1 (13/2/1999 a 14/2/1999) utilizado no processo de calibração na aplicação do modelo TOPMODEL. ....	89

Figura 23 - Vazão horária observada versus vazão horária simulada para o evento 1 de calibração do TOPMODEL na bacia e respectivo modelo de regressão linear entre os valores .....	89
Figura 24 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 2 (16/1/2000 a 17/12/2000) utilizado no processo de calibração na aplicação do modelo TOPMODEL. ....	90
Figura 25 - Vazão horária observada versus vazão horária simulada para o evento 2 de calibração do TOPMODEL na bacia e respectivo modelo de regressão linear entre os eventos .....	90
Figura 26 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 3 (05/3/2001 a 06/3/2001) utilizado no processo de calibração na aplicação do modelo TOPMODEL. ....	91
Figura 27 - Vazão horária observada versus vazão horária simulada para o evento 3 de calibração do TOPMODEL na bacia e respectivo modelo de regressão linear entre os valores .....	91
Figura 28 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 4 (08/3/2001 a 09/3/2001) utilizado no processo de calibração na aplicação do modelo TOPMODEL. ....	92
Figura 29 - Vazão horária observada versus vazão horária simulada para o evento 4 de calibração do TOPMODEL na bacia e respectivo modelo de regressão linear entre os valores .....	92
Figura 30 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 5 (10/3/20001) utilizado no processo de calibração na aplicação do modelo TOPMODEL. ....	93
Figura 31 - Vazão horária observada horária versus vazão horária simulada para o evento 5 de calibração do TOPMODEL na bacia e respectivo modelo de regressão linear entre os valores .....	93
Figura 32 – Variação da vazão máxima observada e simulada para os eventos de validação ..	97
Figura 33 – Variação do volume escoado observado e simulado para os eventos de validação .....	98
Figura 34 – Vazão horária observada versus vazão horária simulada para os eventos de validação do TOPMODEL na bacia e modelo de regressão linear entre os valores .....	98
Figura 35 – Volume escoado observado versus volume escoado simulado para os eventos de validação do TOPMODEL na bacia e modelo de regressão linear entre os valores .....	99
Figura 36 - Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 1 (20/2/1999 a 21/2/1999) utilizado no processo de validação na aplicação do modelo TOPMODEL. ....	100
Figura 37 – Vazão horária observada versus vazão horária simulada para o evento 1 de validação do TOPMODEL na bacia e respectivo modelo de regressão linear entre os valores .....	100
Figura 38 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 2 (27/2/1999 a 28/2/1999) utilizado no processo de validação na aplicação do modelo TOPMODEL. ....	101
Figura 39 – Vazão horária observada versus vazão horária simulada para o evento 2 de validação do TOPMODEL na bacia e respectivo modelo de regressão linear entre os valores .....	101

Figura 40 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 3 (10/12/1999 a 11/12/1999) utilizado no processo de validação na aplicação do modelo TOPMODEL. ....	102
Figura 41 – Vazão horária observada versus vazão horária simulada para o evento 3 de validação do TOPMODEL na bacia e respectivo modelo de regressão linear entre os valores .....	102
Figura 42 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 4 (11/12/1999 a 12/12/1999) utilizado no processo de validação na aplicação do modelo TOPMODEL. ....	103
Figura 43 – Vazão horária observada versus vazão horária simulada para o evento 4 de validação do TOPMODEL na bacia e respectivo modelo de regressão linear entre os valores .....	103
Figura 44 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 5 (13/12/1999 a 14/12/1999) utilizado no processo de validação na aplicação do modelo TOPMODEL. ....	104
Figura 45 – Vazão horária observada versus vazão horária simulada para o evento 5 de validação do TOPMODEL na bacia e respectivo modelo de regressão linear entre os valores .....	104
Figura 46 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 6 (14/12/1999) utilizado no processo de validação na aplicação do modelo TOPMODEL. ....	105
Figura 47 – Vazão horária observada versus vazão horária simulada para o evento 6 de validação do TOPMODEL na bacia e respectivo modelo de regressão linear entre os valores .....	105
Figura 48 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 7 (17/1/2000 a 18/1/2000) utilizado no processo de validação na aplicação do modelo TOPMODEL. ....	106
Figura 49 – Vazão horária observada versus vazão horária simulada para o evento 7 de validação do TOPMODEL na bacia e respectivo modelo de regressão linear entre os valores .....	106
Figura 50 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 8 (25/1/2000 a 26/1/2000) utilizado no processo de validação na aplicação do modelo TOPMODEL. ....	107
Figura 51– Vazão horária observada versus vazão horária simulada para o evento 8 de validação do TOPMODEL na bacia e respectivo modelo de regressão linear entre os valores .....	107
Figura 52 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 9 (26/1/2000 a 27/1/2000) utilizado no processo de validação na aplicação do modelo TOPMODEL. ....	108
Figura 53 – Vazão horária observada versus vazão horária simulada para o evento 9 de validação do TOPMODEL na bacia e respectivo modelo de regressão linear entre os valores .....	108
Figura 54 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 10 (25/6/2000 a 26/6/2000) utilizado no processo de validação na aplicação do modelo TOPMODEL. ....	109

Figura 55 – Vazão horária observada versus vazão horária simulada para o evento 10 de validação do TOPMODEL na bacia e respectivo modelo de regressão linear entre os valores .....	109
Figura 56 – Variação da vazão máxima observada e simulada para os eventos de calibração considerando a hipótese H1 .....	115
Figura 57 – Variação do volume escoado observado e simulado para os eventos de calibração considerando a hipótese H1 .....	116
Figura 58 – Vazão horária observada versus vazão horária simulada para os eventos de calibração, considerando a hipótese H1, e modelo de regressão linear entre os valores.....	116
Figura 59 – Volume escoado observado versus volume escoado simulado para os eventos de calibração, considerando a hipótese H1 e modelo de regressão linear.....	117
Figura 60 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 1 (13/2/1999 a 14/2/1999) utilizado no processo de calibração na aplicação do modelo TOPMODEL considerando a hipótese H1. ....	118
Figura 61 - Vazão horária observada versus vazão horária simulada para o evento 1 de calibração do TOPMODEL considerando a hipótese H1 e respectivo modelo de regressão linear entre os valores .....	118
Figura 62 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 2 (16/1/2000 a 17/12/2000) utilizado no processo de calibração na aplicação do modelo TOPMODEL considerando a hipótese H1. ....	119
Figura 63 - Vazão horária observada versus vazão horária simulada para o evento 2 de calibração do TOPMODEL considerando a hipótese H1 e respectivo modelo de regressão linear entre os valores .....	119
Figura 64 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 3 (05/3/2001 a 06/3/2001) utilizado no processo de calibração na aplicação do modelo TOPMODEL considerando a hipótese H1. ....	120
Figura 65 - Vazão horária observada versus vazão horária simulada para o evento 3 de calibração do TOPMODEL considerando a hipótese H1 e respectivo modelo de regressão linear entre os valores .....	120
Figura 66 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 4 (08/3/2001 a 09/3/2001) utilizado no processo de calibração na aplicação do modelo TOPMODEL considerando a hipótese H1. ....	121
Figura 67 - Vazão horária observada versus vazão horária simulada para o evento 4 de calibração do TOPMODEL considerando a hipótese H1 e respectivo modelo de regressão linear .....	121
Figura 68 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 5 (10/3/20001) utilizado no processo de calibração na aplicação do modelo TOPMODEL considerando a hipótese H1. ....	122
Figura 69 - Vazão horária observada versus vazão horária simulada para o evento 5 de calibração do TOPMODEL considerando a hipótese H1 e respectivo modelo de regressão linear entre os valores .....	122
Figura 70 – Variação da vazão máxima observada e simulada para os eventos de calibração considerando a hipótese H2.....	124
Figura 71 – Variação do volume escoado observado e simulado para os eventos de calibração considerando a hipótese H2.....	124
Figura 72 – Vazão horária observada versus vazão horária simulada para os eventos de calibração, considerando a hipótese H2, e modelo de regressão linear entre os valores.....	125

Figura 73 – Volume escoado observado versus volume escoado simulado para os eventos de calibração, considerando H2 e modelo de regressão linear entre.....	125
Figura 74 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 1 (13/2/1999 a 14/2/1999) utilizado no processo de calibração na aplicação do modelo TOPMODEL considerando a hipótese H2. ....	127
Figura 75 - Vazão horária observada versus vazão horária simulada para o evento 1 de calibração do TOPMODEL considerando a hipótese H2 e respectivo modelo de regressão linear entre os valores.....	127
Figura 76 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 2 (16/1/2000 a 17/12/2000) utilizado no processo de calibração na aplicação do modelo TOPMODEL considerando a hipótese H2. ....	128
Figura 77 - Vazão horária observada versus vazão horária simulada para o evento 2 de calibração do TOPMODEL considerando H2 e respectivo modelo de regressão linear entre os valores.....	128
Figura 78 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 3 (05/3/2001 a 06/3/2001) utilizado no processo de calibração na aplicação do modelo TOPMODEL considerando a hipótese H2. ....	129
Figura 79 - Vazão horária observada versus vazão horária simulada para o evento 3 de calibração do TOPMODEL considerando a hipótese H2 e respectivo modelo de regressão linear entre os valores.....	129
Figura 80 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 4 (08/3/2001 a 09/3/2001) utilizado no processo de calibração na aplicação do modelo TOPMODEL considerando a hipótese H2. ....	130
Figura 81 - Vazão horária observada versus vazão horária simulada para o evento 4 de calibração do TOPMODEL considerando a hipótese H2 e respectivo modelo de regressão linear entre os valores.....	130
Figura 82 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 5 (10/3/20001) utilizado no processo de calibração na aplicação do modelo TOPMODEL considerando a hipótese H2. ....	131
Figura 83 - Vazão horária observada versus vazão simulada horária para o evento 5 de calibração do TOPMODEL considerando a hipótese H2 e respectivo modelo de regressão linear entre os valores.....	131
Figura 84 – Variação da vazão máxima observada e simulada para os eventos de validação considerando a hipótese H1.....	136
Figura 85 – Variação do volume escoado observado e simulado para os eventos de validação considerando a hipótese H1.....	137
Figura 86 – Vazão horária observada versus vazão horária simulada para os eventos de validação, considerando a hipótese H1, e modelo de regressão linear entre os valores.....	137
Figura 87 – Volume escoado observado versus volume escoado simulado para os eventos de validação, considerando a hipótese H1 e modelo de regressão linear.....	138
Figura 88 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 1 (20/2/1999 a 21/2/1999) utilizado no processo de validação na aplicação do modelo TOPMODEL considerando a hipótese H1. ....	139
Figura 89 – Vazão horária observada versus vazão horária simulada para o evento 1 de validação do TOPMODEL considerando a hipótese H1 e respectivo modelo de regressão linear entre os valores.....	139

Figura 90 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 2 (27/2/1999 a 28/2/1999) utilizado no processo de validação na aplicação do modelo TOPMODEL considerando a hipótese H1. ....	140
Figura 91 – Vazão horária observada versus vazão horária simulada para o evento 2 de validação do TOPMODEL considerando a hipótese H1 e respectivo modelo de regressão linear entre os valores .....	140
Figura 92 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 3 (10/12/1999 a 11/12/1999) utilizado no processo de validação na aplicação do modelo TOPMODEL considerando a hipótese H1. ....	141
Figura 93 – Vazão horária observada versus vazão horária simulada para o evento 3 de validação do TOPMODEL considerando a hipótese H1 e respectivo modelo de regressão linear entre os valores .....	141
Figura 94 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 4 (11/12/1999 a 12/12/1999) utilizado no processo de validação na aplicação do modelo TOPMODEL considerando a hipótese H1. ....	142
Figura 95 – Vazão horária observada versus vazão horária simulada para o evento 4 de validação do TOPMODEL considerando a hipótese H1 e respectivo modelo de regressão linear .....	142
Figura 96 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 5 (13/12/1999 a 14/12/1999) utilizado no processo de validação na aplicação do modelo TOPMODEL considerando a hipótese H1. ....	143
Figura 97 – Vazão horária observada versus vazão horária simulada para o evento 5 de validação do TOPMODEL considerando a hipótese H1 e respectivo modelo de regressão linear .....	143
Figura 98 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 6 (14/12/1999) utilizado no processo de validação na aplicação do modelo TOPMODEL considerando a hipótese H1. ....	144
Figura 99 – Vazão observada horária versus vazão horária simulada para o evento 6 de validação do TOPMODEL considerando H1 e respectivo modelo de regressão linear entre os valores.....	144
Figura 100 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 7 (17/1/2000 a 18/1/2000) utilizado no processo de validação na aplicação do modelo TOPMODEL considerando a hipótese H1. ....	145
Figura 101 – Vazão observada versus vazão simulada para o evento 7 de validação do TOPMODEL considerando a hipótese H1 e respectivo modelo de regressão linear entre os valores.....	145
Figura 102 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 8 (25/1/2000 a 26/1/2000) utilizado no processo de validação na aplicação do modelo TOPMODEL considerando a hipótese H1. ....	146
Figura 103 – Vazão observada versus vazão simulada para o evento 8 de validação do TOPMODEL considerando a hipótese H1 e respectivo modelo de regressão linear entre os valores.....	146
Figura 104 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 9 (26/1/2000 a 27/1/2000) utilizado no processo de validação na aplicação do modelo TOPMODEL considerando a hipótese H1. ....	147

Figura 105 – Vazão horária observada versus vazão horária simulada para o evento 9 de validação do TOPMODEL considerando a hipótese H1 e respectivo modelo de regressão linear entre os valores .....	147
Figura 106 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 10 (25/6/2000 a 26/6/2000) utilizado no processo de validação na aplicação do modelo TOPMODEL considerando a hipótese H1. ....	148
Figura 107 – Vazão horária observada versus vazão horária simulada para o evento 10 de validação do TOPMODEL considerando a hipótese H1 e respectivo modelo de regressão linear .....	148
Figura 108 – Variação da vazão máxima observada e simulada para os eventos de validação considerando a hipótese H2.....	150
Figura 109 – Variação do volume escoado observado e simulado para os eventos de validação considerando a hipótese H2.....	150
Figura 110 – Vazão observada versus vazão simulada para os eventos de validação, considerando a hipótese H2, e modelo de regressão linear. ....	151
Figura 111 – Volume escoado observado versus volume escoado simulado para os eventos de validação, considerando a hipótese H2 e modelo de regressão linear entre os valores.....	151
Figura 112 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 1 (20/2/1999 a 21/2/1999) utilizado no processo de validação na aplicação do modelo TOPMODEL considerando a hipótese H2. ....	153
Figura 113 – Vazão horária observada versus vazão horária simulada para o evento 1 de validação do TOPMODEL considerando H2 e respectivo modelo de regressão linear entre os valores.....	153
Figura 114 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 2 (27/2/1999 a 28/2/1999) utilizado no processo de validação na aplicação do modelo TOPMODEL considerando a hipótese H2. ....	154
Figura 115 – Vazão horária observada versus vazão horária simulada para o evento 2 de validação do TOPMODEL considerando a hipótese H2 e respectivo modelo de regressão linear entre os valores .....	154
Figura 116 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 3 (10/12/1999 a 11/12/1999) utilizado no processo de validação na aplicação do modelo TOPMODEL considerando a hipótese H2. ....	155
Figura 117 – Vazão horária observada versus vazão horária simulada para o evento 3 de validação do TOPMODEL considerando H2 e respectivo modelo de regressão linear entre os valores.....	155
Figura 118 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 4 (11/12/1999 a 12/12/1999) utilizado no processo de validação na aplicação do modelo TOPMODEL considerando a hipótese H2. ....	156
Figura 119 – Vazão horária observada versus vazão horária simulada para o evento 4 de validação do TOPMODEL considerando a hipótese H2 e respectivo modelo de regressão linear entre os valores .....	156
Figura 120 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 5 (13/12/1999 a 14/12/1999) utilizado no processo de validação na aplicação do modelo TOPMODEL considerando a hipótese H2. ....	157
Figura 121 – Vazão horária observada versus vazão horária simulada para o evento 5 de validação do TOPMODEL considerando a hipótese H2 e respectivo modelo de regressão linear entre os valores .....	157



Figura 122 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 6 (14/12/1999) utilizado no processo de validação na aplicação do modelo TOPMODEL considerando a hipótese H2. ....	158
Figura 123 – Vazão horária observada versus vazão horária simulada para o evento 6 de validação do TOPMODEL considerando a hipótese H2 e respectivo modelo de regressão linear entre os valores .....	158
Figura 124 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 7 (17/1/2000 a 18/1/2000) utilizado no processo de validação na aplicação do modelo TOPMODEL considerando a hipótese H2. ....	159
Figura 125 – Vazão horária observada versus vazão horária simulada para o evento 7 de validação do TOPMODEL considerando a hipótese H2 e respectivo modelo de regressão linear entre os valores .....	159
Figura 126 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 8 (25/1/2000 a 26/1/2000) utilizado no processo de validação na aplicação do modelo TOPMODEL considerando a hipótese H2. ....	160
Figura 127 – Vazão horária observada versus vazão horária simulada para o evento 8 de validação do TOPMODEL considerando a hipótese H2 e respectivo modelo de regressão linear entre os valores .....	160
Figura 128 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 9 (26/1/2000 a 27/1/2000) utilizado no processo de validação na aplicação do modelo TOPMODEL considerando a hipótese H2. ....	161
Figura 129 – Vazão horária observada versus vazão horária simulada para o evento 9 de validação do TOPMODEL considerando a hipótese H2 e respectivo modelo de regressão linear entre os valores .....	161
Figura 130 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 10 (25/6/2000 a 26/6/2000) utilizado no processo de validação na aplicação do modelo TOPMODEL considerando a hipótese H2. ....	162
Figura 131 – Vazão horária observada versus vazão horária simulada para o evento 10 de validação do TOPMODEL considerando a hipótese H2 e respectivo modelo de regressão linear entre os valores .....	162
Figura 132 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 1 (13/2/1999 a 14/2/1999) utilizado no processo de calibração na aplicação do modelo TOPMODEL. ....	202
Figura 133 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 2 (16/1/2000 a 17/1/2000) utilizado no processo de calibração na aplicação do modelo TOPMODEL. ....	203
Figura 134 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 3 (05/3/2001 a 06/3/2001) utilizado no processo de calibração na aplicação do modelo TOPMODEL. ....	204
Figura 135 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 4 (08/3/2001 a 09/3/2001) utilizado no processo de calibração na aplicação do modelo TOPMODEL. ....	205
Figura 136 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 5 (10/3/2001) utilizado no processo de calibração na aplicação do modelo TOPMODEL. ....	206

Figura 137 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 1 (20/2/1999 a 21/2/1999) utilizado no processo de validação na aplicação do modelo TOPMODEL. ....	208
Figura 138 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 2 (27/2/1999 a 28/2/1999) utilizado no processo de validação na aplicação do modelo TOPMODEL. ....	209
Figura 139 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 3 (10/12/1999 a 11/12/1999) utilizado no processo de validação na aplicação do modelo TOPMODEL. ....	210
Figura 140 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 4 (11/12/1999 a 12/12/1999) utilizado no processo de validação na aplicação do modelo TOPMODEL. ....	211
Figura 141 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 5 (13/12/1999 a 14/12/1999) utilizado no processo de validação na aplicação do modelo TOPMODEL. ....	212
Figura 142 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 6 (14/12/1999) utilizado no processo de validação do na aplicação modelo TOPMODEL. ....	213
Figura 143 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 7 (17/1/2000 a 18/1/2000) utilizado no processo de validação na aplicação do modelo TOPMODEL. ....	214
Figura 144 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 8 (25/1/2000 a 26/1/2000) utilizado no processo de validação na aplicação do modelo TOPMODEL. ....	215
Figura 145 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 9 (26/1/2000 a 27/1/2000) utilizado no processo de validação na aplicação do modelo TOPMODEL. ....	216
Figura 146 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 10 (25/6/2000 a 26/6/2000) utilizado no processo de validação na aplicação do modelo TOPMODEL. ....	217
Figura 147 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 1 (13/2/1999 a 14/2/1999) utilizado no processo de calibração do modelo TOPMODEL aplicado em conjunto a um modelo de interceptação vegetal, considerando a hipótese H1 de distribuição da precipitação interceptada. ....	221
Figura 148 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 2 (16/1/2000 a 17/1/2000) utilizado no processo de calibração do modelo TOPMODEL aplicado em conjunto a um modelo de interceptação vegetal, considerando a hipótese H1 de distribuição da precipitação interceptada. ....	222
Figura 149 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 3 (05/3/2001 a 06/3/2001) utilizado no processo de calibração do modelo TOPMODEL aplicado em conjunto a um modelo de interceptação vegetal, considerando a hipótese H1 de distribuição da precipitação interceptada. ....	223
Figura 150 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 4 (08/3/2001 a 09/3/2001) utilizado no processo de calibração do modelo TOPMODEL aplicado em conjunto a um modelo de interceptação vegetal, considerando a hipótese H1 de distribuição da precipitação interceptada. ....	224

Figura 151 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 5 (10/3/2001) utilizado no processo de calibração do modelo TOPMODEL aplicado em conjunto a um modelo de interceptação vegetal, considerando a hipótese H1 de distribuição da precipitação interceptada. ....	225
Figura 152 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 1 (20/2/1999 a 21/2/1999) utilizado no processo de validação do modelo TOPMODEL aplicado em conjunto a um modelo de interceptação vegetal, considerando a hipótese H1 de distribuição da precipitação interceptada. ....	227
Figura 153 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 2 (27/2/1999) 28/2/1999) utilizado no processo de validação do modelo TOPMODEL aplicado em conjunto a um modelo de interceptação vegetal, considerando a hipótese H1 de distribuição da precipitação interceptada. ....	228
Figura 154 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 3 (10/12/1999 a 11/12/1999) utilizado no processo de validação do modelo TOPMODEL aplicado em conjunto a um modelo de interceptação vegetal, considerando a hipótese H1 de distribuição da precipitação interceptada. ....	229
Figura 155 - Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 4 (11/12/1999 a 12/12/1999) utilizado no processo de validação do modelo TOPMODEL aplicado em conjunto a um modelo de interceptação vegetal, considerando a hipótese H1 de distribuição da precipitação interceptada. ....	230
Figura 156 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 5 (13/12/1999 a 14/12/1999) utilizado no processo de validação do modelo TOPMODEL aplicado em conjunto a um modelo de interceptação vegetal, considerando a hipótese H1 de distribuição da precipitação interceptada. ....	231
Figura 157 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 6 (14/12/1999) utilizado no processo de validação do modelo TOPMODEL aplicado em conjunto a um modelo de interceptação vegetal, considerando a hipótese H1 de distribuição da precipitação interceptada. ....	232
Figura 158 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 7 (17/1/2000 a 18/1/2000) utilizado no processo de validação do modelo TOPMODEL aplicado em conjunto a um modelo de interceptação vegetal, considerando a hipótese H1 de distribuição da precipitação interceptada. ....	233
Figura 159 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 8 (25/1/2000 a 26/1/2000) utilizado no processo de validação do modelo TOPMODEL aplicado em conjunto a um modelo de interceptação vegetal, considerando a hipótese H1 de distribuição da precipitação interceptada. ....	234
Figura 160 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 9 (26/1/2000 a 27/1/2000) utilizado no processo de validação do modelo TOPMODEL aplicado em conjunto a um modelo de interceptação vegetal, considerando a hipótese H1 de distribuição da precipitação interceptada. ....	235
Figura 161 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 10 (25/6/2000 a 26/6/2000) utilizado no processo de validação do modelo TOPMODEL aplicado em conjunto a um modelo de interceptação vegetal, considerando a hipótese H1 de distribuição da precipitação interceptada. ....	236
Figura 162 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 1 (13/2/1999 a 14/2/1999) utilizado no processo de calibração do modelo TOPMODEL	

aplicado em conjunto a um modelo de interceptação vegetal, considerando a hipótese H2 de distribuição da precipitação interceptada. ....	239
Figura 163 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 2 (16/1/2000 a 17/1/2000) utilizado no processo de calibração do modelo TOPMODEL aplicado em conjunto a um modelo de interceptação vegetal, considerando a hipótese H2 de distribuição da precipitação interceptada. ....	240
Figura 164 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 3 (05/3/2001 a 06/3/2001) utilizado no processo de calibração do modelo TOPMODEL aplicado em conjunto a um modelo de interceptação vegetal, considerando a hipótese H2 de distribuição da precipitação interceptada. ....	241
Figura 165 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 4 (08/3/2001 a 09/3/2001) utilizado no processo de calibração do modelo TOPMODEL aplicado em conjunto a um modelo de interceptação vegetal, considerando a hipótese H2 de distribuição da precipitação interceptada. ....	242
Figura 166 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 5 (10/3/2001) utilizado no processo de calibração do modelo TOPMODEL aplicado em conjunto a um modelo de interceptação vegetal, considerando a hipótese H2 de distribuição da precipitação interceptada. ....	243
Figura 167 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 1 (20/2/1999 a 21/2/1999) utilizado no processo de validação do modelo TOPMODEL aplicado em conjunto a um modelo de interceptação vegetal, considerando a hipótese H2 de distribuição da precipitação interceptada. ....	245
Figura 168 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 2 (27/2/1999 a 28/2/1999) utilizado no processo de validação do modelo TOPMODEL aplicado em conjunto a um modelo de interceptação vegetal, considerando a hipótese H2 de distribuição da precipitação interceptada. ....	246
Figura 169 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 3 (10/12/1999 a 11/12/1999) utilizado no processo de validação do modelo TOPMODEL aplicado em conjunto a um modelo de interceptação vegetal, considerando a hipótese H2 de distribuição da precipitação interceptada. ....	247
Figura 170 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 4 (11/12/1999 a 12/12/1999) utilizado no processo de validação do modelo TOPMODEL aplicado em conjunto a um modelo de interceptação vegetal, considerando a hipótese H2 de distribuição da precipitação interceptada. ....	248
Figura 171 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 5 (13/12/1999 a 14/12/1999) utilizado no processo de validação do modelo TOPMODEL aplicado em conjunto a um modelo de interceptação vegetal, considerando a hipótese H2 de distribuição da precipitação interceptada. ....	249
Figura 172 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 6 (14/12/1999) utilizado no processo de validação do modelo TOPMODEL aplicado em conjunto a um modelo de interceptação vegetal, considerando a hipótese H2 de distribuição da precipitação interceptada. ....	250
Figura 173 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 7 (17/1/2000 a 18/1/2000) utilizado no processo de validação do modelo TOPMODEL aplicado em conjunto a um modelo de interceptação vegetal, considerando a hipótese H2 de distribuição da precipitação interceptada. ....	251

Figura 174 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 8 (25/1/2000 a 26/1/2000) utilizado no processo de validação do modelo TOPMODEL aplicado em conjunto a um modelo de interceptação vegetal, considerando a hipótese H2 de distribuição da precipitação interceptada. ....	252
Figura 175 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 9 (26/1/2000 a 27/1/2000) utilizado no processo de validação do modelo TOPMODEL aplicado em conjunto a um modelo de interceptação vegetal, considerando a hipótese H2 de distribuição da precipitação interceptada. ....	253
Figura 176 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 10 (25/6/2000 a 26/6/2000) utilizado no processo de validação do modelo TOPMODEL aplicado em conjunto a um modelo de interceptação vegetal, considerando a hipótese 2 de distribuição da precipitação interceptada. ....	254

## **LISTA DE QUADROS**

Quadro 1 - Exemplos de modelos utilizados no gerenciamento dos recursos hídricos.....	10
Quadro 2 – Valores dos parâmetros $m$ , $T_0$ , $CHV$ , $SR_{max}$ do modelo TOPMODEL utilizados por diferentes autores.....	165

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Eventos escolhidos para aplicação do modelo TOPMODEL: período, duração, precipitação total ( $P_T$ ) e vazão máxima observada ( $Q_{\max\text{obs}}$ ).....	81
Tabela 2 – Eventos selecionados para o processo de Calibração - Período, duração, precipitação total ( $P_T$ ), vazão máxima observada ( $Q_{\max\text{obs}}$ ), volume escoado observado ( $V_{\text{esc}_{\text{obs}}}$ ), coeficiente de escoamento observado (Coef. de $\text{esc}_{\text{obs}}$ ).....	83
Tabela 3 – Valores dos parâmetros do modelo TOPMODEL obtidos no processo de calibração .....	84
Tabela 4 – Valores do parâmetro déficit inicial de umidade na zona radicular ( $SR_0$ ) do modelo TOPMODEL e de eficiência de Nash e Sucliffe (E) dos eventos de calibração.....	84
Tabela 5– Eventos de Calibração - Valores de duração dos eventos, precipitação total ( $P_T$ ), vazão máxima simulada ( $Q_{\max\text{sim}}$ ), volume escoado simulado ( $V_{\text{esc}_{\text{sim}}}$ ), coeficiente de escoamento simulado (Coef. de $\text{esc}_{\text{sim}}$ ) . .....	85
Tabela 6 – Eventos selecionados para o processo de validação - Período dos eventos, duração, precipitação total ( $P_T$ ), vazão máxima observada ( $Q_{\max\text{obs}}$ ), volume escoado observado ( $V_{\text{esc}_{\text{obs}}}$ ), coeficiente de escoamento observado (Coef. de $\text{esc}_{\text{obs}}$ ).....	94
Tabela 7 – Valores do parâmetro déficit inicial de umidade na zona radicular ( $SR_0$ ) do modelo TOPMODEL e de eficiência de Nash e Sucliffe (E) dos eventos de validação.....	95
Tabela 8 – Eventos de Validação - Valores de duração dos eventos, precipitação total ( $P_T$ ), vazão máxima observada ( $Q_{\max\text{sim}}$ ), volume escoado observado ( $V_{\text{esc}_{\text{sim}}}$ ), coeficiente de escoamento observado (Coef. de $\text{esc}_{\text{sim}}$ ).....	96
Tabela 9 – Valores médios do IAF semanal para a bacia, tendo como início o mês de maio, para um período de 12 meses. ....	110
Tabela 10 - Valores de precipitação total ( $P_T$ ); de IAF; dos coeficientes angular e linear, da lâmina de água no solo ( $P_L$ ), e da precipitação interceptada ( $P_P$ ) resultantes da aplicação do modelo de CASTILHO (2000) para os eventos de calibração.....	111
Tabela 11 – Valores de escoamento pelo colmo (EC) resultantes da aplicação do modelo de escoamento pelo colmo para os eventos de calibração.....	112
Tabela 12 – Valores de $P_S$ e $\phi$ determinados para os eventos de calibração do modelo TOPMODEL em conjunto com um modelo de interceptação vegetal.....	112
Tabela 13 - Parâmetros do modelo TOPMODEL aplicado em conjunto ao modelo de interceptação vegetal obtidos no processo de calibração .....	113
Tabela 14 – Valores do parâmetro déficit inicial de umidade na zona radicular ( $SR_0$ ) do modelo TOPMODEL e de eficiência de Nash e Sucliffe (E) dos eventos de calibração considerando a hipótese H1 de distribuição da precipitação interceptada. ....	113
Tabela 15 – Valores do parâmetro déficit inicial de umidade na zona radicular ( $SR_0$ ) do modelo TOPMODEL e de eficiência de Nash e Sucliffe (E) dos eventos de calibração considerando a hipótese H2.....	114
Tabela 16– Eventos de Calibração - Valores de duração dos eventos, precipitação que chega ao solos ( $P_S$ ), vazão máxima simulada ( $Q_{\max\text{sim}}$ ), volume escoado simulado ( $V_{\text{esc}_{\text{sim}}}$ ), coeficiente de escoamento simulado (Coef. de $\text{esc}_{\text{sim}}$ ), considerando a hipótese H1 de distribuição da precipitação interceptada .....	115
Tabela 17– Eventos de Calibração - Valores de duração dos eventos, precipitação que chega ao solo ( $P_S$ ), vazão máxima simulada ( $Q_{\max\text{sim}}$ ), volume escoado simulado ( $V_{\text{esc}_{\text{sim}}}$ ), coeficiente de escoamento simulado (Coef. de $\text{esc}_{\text{sim}}$ ), considerando a hipótese H2 de distribuição da precipitação interceptada .....	123

Tabela 18 - Valores de precipitação total ( $P_T$ ); de IAF; dos coeficientes angular e linear, da lâmina de água no solo ( $P_L$ ) resultantes da aplicação do modelo de Castilho (2000) para os eventos de validação. ....	132
Tabela 19 – Valores de escoamento pelo colmo (EC) resultantes da aplicação do modelo de escoamento pelo colmo para os eventos de validação. ....	133
Tabela 20 – Valores de $P_S$ e $\phi$ determinados para os eventos de validação do modelo TOPMODEL em conjunto com um modelo de interceptação vegetal. ....	133
Tabela 21 – Valores do parâmetro déficit inicial de umidade na zona radicular ( $SR_0$ ) do modelo TOPMODEL e de eficiência de Nash e Sucliffe (E) dos eventos de calibração considerando a hipótese H1 de distribuição da precipitação interceptada. ....	134
Tabela 22 – Valores do parâmetro déficit inicial de umidade na zona radicular ( $SR_0$ ) do modelo TOPMODEL e de eficiência de Nash e Sucliffe (E) dos eventos de calibração considerando a hipótese H2. ....	135
Tabela 23 – Eventos de Validação - Valores de duração dos eventos, precipitação total corrigida ( $P_S$ ), vazão máxima simulada ( $Q_{maxsim}$ ), volume escoado simulado ( $V_{escsim}$ ), coeficiente de escoamento simulado (Coef. de $esc_{sim}$ ), considerando a hipótese H1 de distribuição da precipitação interceptada. ....	136
Tabela 24 – Eventos de Validação - Valores de duração dos eventos, precipitação total corrigida ( $P_S$ ), vazão máxima simulada ( $Q_{maxsim}$ ), volume escoado simulado ( $V_{escsim}$ ), coeficiente de escoamento simulado (Coef. de $esc_{sim}$ ), considerando a hipótese H2 de distribuição da precipitação interceptada. ....	149



## RESUMO

O estudo dos mecanismos hidrológicos bem como a determinação das disponibilidades hídricas em bacias hidrográficas fornecem condições para avaliação dos recursos hídricos. O modelo semi-distribuído de transformação de chuva em vazão TOPMODEL tem sido, mundialmente utilizado por pesquisadores, desde seu desenvolvimento em 1979. O trabalho desenvolvido utilizou o TOPMODEL para simular o comportamento hidrológico de uma bacia rural com área de 4,6km<sup>2</sup>, cultivada predominantemente com cana-de-açúcar, localizada na região do município de Limeira-SP. O modelo foi aplicado em duas fases: isoladamente e acoplado a um modelo de interceptação de chuva pela cobertura vegetal, considerando duas hipóteses (H1 e H2) para a distribuição da precipitação interceptada ao longo do tempo. Na hipótese H1, a precipitação interceptada ( $P_p$ ) é distribuída uniformemente ao longo do tempo, sendo que cada valor de precipitação ao longo do tempo do evento em análise é multiplicado por um coeficiente de correção  $\phi$ , calculado por meio da relação entre a precipitação interceptada e incidente. Na hipótese H2, a quantidade total de precipitação interceptada ( $P_p$ ) durante o evento analisado é subtraída do primeiro valor de chuva do evento ( $P_1$ ), ou, dos primeiros valores caso  $P_p$  seja maior que  $P_n$ . A aplicação do modelo TOPMODEL isoladamente apresentou valor médio de eficiência de Nash e Sucliffe de 50,8%, sendo a variação média entre valores de vazão máxima observada e simulada igual a 0,6%. Quando foi considerada a hipótese H1, esses valores foram: 41,3% e -2,5%, respectivamente. Para a hipótese H2, os valores foram 48,6% e -2,0%. Os resultados mostraram que a utilização do modelo TOPMODEL em conjunto ao modelo de interceptação vegetal apresentaram-se muito próximos aos obtidos considerando o TOPMODEL em suas condições originais, e ainda produz melhora na qualidade da informação a respeito do comportamento hidrológico da bacia.

## ABSTRACT

The study of hydrological mechanisms as well as determination of available water in watersheds provides conditions for assessment of water resources. The semi-distributed model of rainfall transformation into flow TOPMODEL has been widely used by researchers, since its development in 1979. This paper describes the use of TOPMODEL to simulate the hydrological behavior of a rural watershed with an area of 4.6 km<sup>2</sup>, mainly cultivated with sugar cane, located in the city of Limeira, in the State of São Paulo. The model was implemented in two phases: isolated and coupled with a model of rainfall interception by vegetation, considering two hypotheses (H1 and H2) for the distribution of precipitation intercepted over time. In hypothesis H1, the intercepted precipitation ( $P_p$ ) is evenly distributed over time, and each value of rainfall over time of the event in question is multiplied by a coefficient of correction  $\alpha$ , calculated using the relationship between the intercepted and incident precipitation. In hypothesis H2, the total amount of intercepted precipitation ( $P_p$ ) during the event analyzed is subtracted from the first value of the rainfall event ( $P_1$ ) or from the first amounts, in case  $P_p$  is greater than  $P_1$ . The application of the TOPMODEL alone showed an efficiency mean value of Nash and Sucliffe of 50.8%, and the average variation between values of observed and simulated maximum flow was equal to 0.6%. When H1 hypothesis was considered, these values were 41.3% and -2.5% respectively. For H2 hypothesis, the values were 48.6% and -2.0%. The results showed that the use of TOPMODEL together with a model of rainfall interception by vegetation were very close to those obtained considering the TOPMODEL in its original conditions, also providing improvement in the quality of information about the hydrological behavior of the watershed.

## 1. INTRODUÇÃO

A água, além de ser componente bioquímico dos seres vivos, meio de vida de várias espécies vegetais e animais, é elemento representativo de valores sociais e culturais e, sobretudo, fator de produção de bens de consumo final e intermediário.

À medida que a sociedade moderna amplia sua busca por conforto aumenta a necessidade de água, porém o crescimento da demanda mundial por água de boa qualidade ocorre a uma taxa superior a da renovabilidade do ciclo hidrológico. Este fato tende a ser uma das maiores pressões antrópicas sobre os recursos naturais do planeta neste século. O consumo mundial cresceu seis vezes entre os anos de 1900 e 1995, crescimento este superior ao dobro da taxa de crescimento populacional (FREITAS, 1999).

Globalmente, as fontes hídricas são abundantes, porém encontram-se distribuídas irregularmente na superfície terrestre, provocando sérias limitações para o desenvolvimento de muitas regiões, restringindo o atendimento às necessidades humanas e degradando ecossistemas. A Organização Meteorológica Mundial das Nações Unidas estima que um terço da população mundial vive em regiões de moderado a alto estresse hídrico, o que significa possuir nível de consumo superior a 20% de sua disponibilidade de água. Outro estudo da ONU prevê um panorama assustador: 45% da população mundial ficará sem água no ano de 2025.

O aumento das necessidades de água não ocorre apenas nos setores industrial e doméstico, a demanda mundial de alimentos tem efeito direto no aumento do uso da água. A agricultura é, atualmente, responsável por cerca de 70% do consumo mundial de água, e nos próximos vinte e cinco anos, o crescimento de lavouras irrigadas será a maior parcela de acréscimo de consumo neste setor (FREITAS, 1999).

Aliada à crescente escassez de água está a questão da poluição concentrada e difusa dos corpos hídricos que são degradados por eutrofização, metais pesados, acidificação, poluentes orgânicos e outros poluentes tóxicos. A poluição também afeta os recursos hídricos subterrâneos, onde a contaminação é lentamente diluída e as práticas de despoluição são extremamente onerosas.

À medida que as fontes de água potável são reduzidas, a competição por elas aumenta como consequência da expansão de áreas urbanas e agro-industriais, tornando imprescindível

a implementação de sistemas de cobrança e controle do uso da água. Além disso, quando um recurso se torna escasso passa a ser motivo de divergência e, a ambição por sua posse ou domínio, razão para acionar forças persuasivas, o que pode vir a fazer da água um diferencial competitivo nas relações internacionais.

O Brasil, apesar de apresentar a maior disponibilidade hídrica do planeta (13,8% do deflúvio mundial) e ter uma produção hídrica em território nacional de cerca de 182.170m<sup>3</sup>/s (Superintendência de Estudos e Informações Hidrológicas da ANEEL *apud* FREITAS, 1999), não está imune aos problemas que envolvem os recursos hídricos, como por exemplo, a dependência do país quanto ao uso destes recursos para produção de energia elétrica - atualmente afetada tão drasticamente, além de outros fatores, pela estiagem de chuvas. Além disso, 80% da água do país estão situados na Bacia Amazônica, longe dos centros consumidores.

Dados de balanço hídrico mostram a grande diversidade hidrológica do território brasileiro. Como exemplo pode-se citar a variação de disponibilidade per capita de água, extraída de dados da Superintendência de Estudos e Informações Hidrológicas da ANEEL: 1835m<sup>3</sup>/habitante/ano na Bacia do Atlântico Leste 1 e 628.938m<sup>3</sup>/habitante/ano na Bacia Amazônica (FREITAS, 1999). As bacias hidrográficas brasileiras totalizam uma área de 8.512 x 10<sup>3</sup>km<sup>2</sup>, servem a uma população de mais de 157 milhões de habitantes e apresentam vazão de 182.170m<sup>3</sup>/s (FREITAS, 1999). O estado de São Paulo abriga 22% da população brasileira e dispõe apenas 1,65% da água doce disponível no Brasil (SABESP, 2002).

A bacia do rio Piracicaba compreende uma área de drenagem de 12.400 km<sup>2</sup>, 90% dos quais situados no estado de São Paulo e o restante no extremo sul de Minas Gerais. A população residente na bacia do rio Piracicaba ultrapassava 3 milhões de pessoas (em 1998) de acordo com dados do SEADE (Sistema Estadual de Análise de Dados). A disponibilidade hídrica média na bacia é de 165 m<sup>3</sup>/s, caindo para 40 m<sup>3</sup>/s em épocas de estiagens. O Sistema Cantareira, que transpõe as águas da bacia para a Região Metropolitana de São Paulo, não tem mantido a vazão mínima de 40 m<sup>3</sup>/s estabelecida para o rio Piracicaba. O uso urbano (11,2 m<sup>3</sup>/s) e o industrial (9,9 m<sup>3</sup>/s) são responsáveis pela maior parte do consumo de água na Bacia (81%) enquanto o uso para a irrigação é responsável por 19% (25 m<sup>3</sup>/s) (PEREIRA *et al*, 2004).

Para que seja preservado e garantido o direito de acesso às reservas e corpos hídricos, nos mais diversos pontos do país, das gerações atuais e futuras, é fundamental que se tenha um profundo conhecimento das necessidades de seus usuários e da capacidade de oferta e renovação das fontes naturais, o que fornecerá subsídios para a definição de princípios regulatórios e da capacidade de suporte de cada bacia hidrográfica.

Desta forma, sendo a bacia hidrográfica - unidade fisiográfica com limites físicos próprios definidos geograficamente, a qual representa um sistema físico cuja entrada é o volume precipitado e a saída, o volume de água escoado pelo exutório, considerando ainda que ocorrem perdas intermediárias representadas pelos volumes evaporados, transportados e infiltrados nas camadas profundas – é de suma importância identificar os principais elementos de subsistemas e quantificar suas interações, o que proporciona uma visão global do sistema (bacia hidrográfica).

As bacias hidrográficas constituem a principal escala de estudos envolvendo recursos naturais, especialmente quando há interesses em aspectos relacionados à qualidade e/ou disponibilidade de água. Essa escala espacial pode ser considerada como unidade de paisagem capaz de integrar os principais componentes relacionados com qualidade e disponibilidade de água: atmosfera, cobertura vegetal, solos, geologia e paisagem circundante. Dentre esses componentes, destaca-se a cobertura vegetal que merece atenção especial uma vez que, os mecanismos de controle de fluxo de água pela vegetação são fundamentais para a definição do balanço hídrico em bacias hidrográficas.

A determinação das disponibilidades de recursos hídricos em uma bacia hidrográfica apresenta grande complexidade, em função das interações existentes entre os diferentes fatores do ciclo hidrológico. A compreensão dos mecanismos hidrológicos envolvidos entre esses fatores possibilita condições suficientes para avaliação da dinâmica dos recursos hídricos. O uso de modelos hidrológicos de simulação representa uma ferramenta fundamental uma vez que a modelagem torna possível extrapolar resultados de maneira mais rápida.

O trabalho foi desenvolvido tendo como hipótese que a utilização de um modelo de interceptação de chuva acoplado ao modelo de precipitação-vazão TOPMODEL, produz uma melhora na qualidade da informação a respeito do comportamento hidrológico das bacias hidrográficas, sem que ocorra alteração significativa dos resultados finais da simulação quando se considera as condições originais do TOPMODEL.

## 2. OBJETIVOS

O objetivo geral deste trabalho foi:

- Simular o comportamento hidrológico de uma bacia rural com cobertura predominante de cana-de-açúcar utilizando o modelo TOPMODEL.

Os objetivos específicos foram:

- Determinar por meio de calibração um conjunto de parâmetros do modelo TOPMODEL válido para simulação de eventos de chuva e vazão da bacia;
- Validar o conjunto de parâmetros determinado no processo calibração;
- Desenvolver o modelo de interceptação de chuva na cobertura vegetal para a bacia;
- Calcular os valores de chuva que atingem o solo para os eventos de precipitação ocorridos na bacia, considerando duas hipóteses de distribuição da precipitação interceptada ao longo do tempo;
- Determinar por meio de calibração um conjunto de parâmetros do modelo TOPMODEL válido para simulação de eventos de chuva e vazão da bacia, considerando as duas hipóteses da distribuição da precipitação interceptada;
- Validar o conjunto de parâmetros determinado no processo calibração do modelo TOPMODEL utilizado com o modelo de interceptação vegetal, considerando as duas hipóteses da distribuição da precipitação interceptada;
- Comparar os resultados da simulação do modelo TOPMODEL com as alterações das condições de precipitação de água no solo da bacia.

### **3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

As escalas espaciais envolvidas dentro dos objetivos de gestão, manejo e proteção de recursos naturais, em especial os recursos hídricos em zonas cultivadas, são desenvolvidas em bacias hidrográficas, as quais podem ser consideradas como a escala de diagnóstico em termos de qualidade e quantidade de água. Nesse nível tem-se a formação dos recursos hídricos assim como a integração das variabilidades do meio e dos mecanismos.

A utilização de modelos de simulação representa uma ferramenta fundamental para o estabelecimento do balanço hídrico e hidrológico em bacias hidrográficas. Diversos modelos hidrológicos foram desenvolvidos para simulação de bacias (SINGH, 1989) sendo que a escolha de um deles depende do objetivo, da precisão desejada, da disponibilidade e da qualidade de dados.

Este capítulo aborda três temas principais, os quais basearam o desenvolvimento da pesquisa realizada. São eles: Modelagem Hidrológica, TOPMODEL e Interceptação Vegetal.

#### ***3.1. Modelagem hidrológica***

O ciclo hidrológico envolve fenômenos cuja modelagem matemática exata se torna impossível, devido à própria natureza dos fenômenos e à dificuldade na aquisição de dados.

Na impossibilidade de modelar o ciclo hidrológico de forma exata, este pode ser representado de forma aproximada por um sistema conceitual. Este sistema é constituído por subsistemas como água atmosférica, água superficial e água subterrânea. Cada um desses subsistemas possui vários processos. Assim, o subsistema que representa a água atmosférica engloba a precipitação, evaporação, interceptação e transpiração. O subsistema da água superficial contém os processos de interceptação e escoamento superficial. O subsistema constituído pelas águas subterrâneas reúne os processos de infiltração, recarga de aquíferos, escoamentos subsuperficial e subterrâneo.

Para a maior parte dos problemas práticos não é necessário modelar o ciclo hidrológico na sua totalidade, mas apenas uma fração do mesmo. Assim, pode-se definir um sistema hidrológico como uma estrutura ou um volume no espaço, delimitado por uma fronteira, por onde entra e sai água, ar e energia térmica sob diferentes formas.

A análise de um sistema hidrológico objetiva estudar e compreender o funcionamento do sistema a fim de determinar suas respostas. O modelo de um sistema hidrológico é uma aproximação do sistema real, sendo que as suas entradas e saídas, funções do tempo e do espaço, são variáveis mensuráveis e sua estrutura é um conjunto de equações que relacionam as entradas com as saídas.

Considerando o sistema como uma bacia hidrográfica, os modelos hidrológicos constituem uma ferramenta para entender e compreender melhor o comportamento da bacia, bem como prever condições diferentes das observadas. A simulação hidrológica é limitada pela heterogeneidade física da bacia e dos processos envolvidos, fato que tem propiciado o desenvolvimento de um grande número de modelos que se diferenciam de acordo com os dados utilizados, discretização, prioridades da representação dos processos e dos objetivos a serem atingidos (TUCCI, 1998).

Os problemas que a hidrologia enfrenta podem ser classificados em três tipos: - problemas de análise, onde as entradas e o sistema físico são conhecidos e se busca a resposta; - problemas de síntese nos quais entradas e saídas são conhecidas e procura-se o sistema físico; - problemas de controle ou verificação, nos quais se conhece o sistema físico e a resposta e desejam-se os valores das entradas (MOTA, 1999).

O objetivo de um modelo hidrológico é determinar com eficiência e precisão os componentes do ciclo hidrológico em uma bacia, estimar eficientemente o comportamento e a magnitude (abundância ou carência) de água nos fenômenos de frequência rara. A consideração e o uso dos modelos hidrológicos são primordiais para avaliar, simular e prever os danos causados por inundações; para resolver problemas práticos de inventários; para planejar, projetar, manejar e para tomar decisões sobre os recursos hídricos em uma bacia, região ou país (MOTA, 1999).

Os modelos hidrológicos podem ser divididos em categorias: físicos, analógicos, matemáticos. Os modelos físicos representam o sistema por meio de um protótipo em escala reduzida. Os modelos analógicos utilizam analogia das equações que regem os diferentes fenômenos, para modelar no sistema mais conveniente, o processo desejado. Nos modelos matemáticos, o funcionamento do sistema é traduzido por um conjunto de equações que relacionam as variáveis de entrada às de saída.



De acordo com TUCCI (1998), os modelos matemáticos são mais versáteis, pois se pode facilmente modificar a sua lógica, obtendo respostas de diferentes situações de um mesmo sistema, além de grande velocidade de resposta. Todavia, apresentam como desvantagens a discretização de processos contínuos e dificuldade de representar matematicamente alguns processos físicos. Para MOTA (1999) os modelos matemáticos proporcionam respostas quantitativas dos fenômenos físicos; são ferramentas para experimentar sem destruir; ajudam a interpolar, simular e prever o fenômeno físico em estudo; auxiliam na definição de metodologias; caracterizam a influência das variáveis que participam do modelo; ajudam a sugerir prioridades de investigação; servem para treinar e instruir; estimulam a participação e comunicação da equipe de trabalho.

Segundo MOTA (1999), a elaboração de um modelo matemático hidrológico engloba quatro etapas: identificação, calibração, validação e limites de aplicação. A identificação se refere a uma análise da estrutura do modelo e das relações internas que guardam seus elementos. É nesta fase que se define o número de variáveis que vão participar e se estabelecem as hipóteses e suposições que simplificarão o modelo em função de seus objetivos e da precisão de seus resultados.

A calibração consiste na avaliação e estimativa dos parâmetros do modelo mediante a ajuda de critérios dedutivos e observações anteriores relativos aos requerimentos (entradas) e as respostas (saídas). Em geral, a estimativa dos parâmetros pode ser passiva ou ativa. Na forma passiva, são considerados todos os pares de valores de entradas e saídas disponíveis, e por um método estatístico se avaliam os coeficientes das equações. Na forma ativa, é utilizado um método seletivo, dando maior importância a certas observações ou a um grupo de informações (MOTA, 1999).

Na etapa de validação, faz-se a simulação do modelo com os parâmetros estimados onde se verifica a validade do ajuste realizado (TUCCI, 1998). MOTA (1999) salienta que o valor das entradas e saídas utilizadas para validação do modelo devem ser diferentes daquelas usadas na fase de calibração. Ainda de acordo com MOTA (1999), a validação pode ser feita de maneira puramente intuitiva, como a comparação visual de resultados mediante a um quadro ou um gráfico, ou, de maneira analítica como a comparação estatística de resultados por meio de provas e critérios apropriados.

O modelo deve especificar claramente a estrutura dentro da qual foi desenvolvido, sua hierarquia, os objetivos considerados. Devem estar bem definidos os limites físicos - como, por exemplo, condições climáticas extremas sob as quais o modelo foi calibrado, de maneira que o mesmo não poderá ser utilizado em regiões tropicais e/ou temperadas, uma vez que existe o risco de diferenças e erros, e os limites analíticos – número de observações requeridas, precisão considerada, coeficiente de eficiência necessário para comparar valores observados e simulados (MOTA, 1999).

TUCCI (1998) apresenta os modelos ou sistemas classificados como: de memória, de linearidade, contínuo e discreto, concentrado e distribuído, estocástico e determinístico, conceitual e empírico. MOTA (1999) classifica os modelos matemáticos hidrológicos em dois grupos: modelos de não-otimização, nos quais estão enquadrados os modelos determinísticos e os estatísticos (classificados em modelos de regressão e correlação, modelos probabilísticos e modelos estocásticos) e modelos de otimização, chamados modelos de sistemas. De acordo com MOTA (1999), em um modelo determinístico não se considera a probabilidade de ocorrência de valores e de variáveis envolvidas no processo, mas se considera que tal processo está representado (implícita ou explicitamente) por uma hipótese, segundo a qual, o conhecimento das leis de evolução de fenômenos físicos e de seu estado atual permite prever rigorosamente seus estados futuros de acordo com a física clássica. Os modelos estatísticos são do tipo indutivo, baseiam-se nos métodos e nas técnicas estatísticas para fazer notar suas relações de entrada e saída, em concordância com o interesse secundário dos processos físicos do sistema.

Resumidamente, um modelo é tido como global quando não considera a variabilidade espacial e, distribuído, quando as variáveis e parâmetros do modelo dependem do espaço e/ou tempo. Modelos determinísticos não consideram aleatoriedade, sendo que para um determinado conjunto de variáveis de entrada corresponde sempre um mesmo conjunto de variáveis de saída. Nos modelos estocásticos, para um valor de entrada se obtém uma resposta diferente cada vez que se usa o modelo. Um modelo é dito conceitual quando as funções utilizadas na sua elaboração consideram os processos físicos. Modelos empíricos são aqueles em que se ajustam os valores calculados aos dados observados, por meio de funções que não têm nenhuma relação com os processos físicos envolvidos.

De acordo com TUCCI (1998), os modelos conceituais podem ser subdivididos em: semiconceituais e físicos. Os modelos semiconceituais são modelos que relacionam características do processo, embora mantenham um razoável empirismo nos parâmetros das equações envolvidas. Os modelos físicos utilizam as principais equações diferenciais do sistema físico para representar os processos e, os seus parâmetros são aqueles que mais se aproximam da física do sistema. Estes modelos apresentam dificuldades devido à variabilidade espacial dos processos e na estimativa dos parâmetros.

Para uso no gerenciamento dos recursos hídricos os modelos são classificados como: modelos de comportamento - para prognosticar a resposta de um sistema sujeito a diferentes entradas ou devido a modificações nas suas características; modelos de otimização – buscam-se as melhores soluções, dentro de um projeto, para um sistema específico; modelos de planejamento – simulam condições globais de um sistema maior (TUCCI, 1998). O quadro 1 apresenta alguns exemplos de modelos utilizados no gerenciamento dos recursos hídricos.

Os principais modelos utilizados na área de produção agrícola são: precipitação – vazão, balanço de reservatório, balanço agrícola, projeto e otimização de rede de canais. Para o gerenciamento de recursos hídricos, os modelos mais utilizados são: precipitação – vazão, regionalização de variáveis hidrológicas, modelos de balanço e escoamento de rios.

**Quadro 1 - Exemplos de modelos utilizados no gerenciamento dos recursos hídricos**

(Fonte: Adaptado de TUCCI, 1998).

<b>Nome</b>	<b>Tipo</b>	<b>Estrutura</b>	<b>Características</b>	<b>Usos</b>
Precipitação - Vazão	Determinístico; Empírico; Conceitual	Comportamento	Calcula a vazão de uma bacia a partir da chuva.	Extensão de séries de vazão; dimensionamento; previsão em tempo atual; avaliação do uso da terra.
Vazão – Vazão	Determinístico; Empírico; Conceitual	Comportamento	Calcula a vazão de uma seção a partir de um ponto a montante.	Extensão de série de vazões; dimensionamento; previsão de cheia.
Geração estocástica de vazão	Estocástico	Comportamento	Calcula a vazão com base nas características da série histórica.	Dimensionamento do volume de um reservatório.
Fluxo saturado	Determinístico	Comportamento	Determina o movimento, vazão potencial de águas subterrâneas.	Capacidade de bombeamento; nível do lençol freático; interação rio – aquífero.
Hidrodinâmico	Determinístico	Comportamento	Sintetiza vazões em rios e rede de canais.	Simulação de alterações do sistema; efeitos de escoamento de jusante.
Qualidade de água de rios e reservatórios	Determinístico	Comportamento	Simula a concentração de parâmetros de qualidade da água.	Impacto de efluentes; eutrofização de reservatórios; condições ambientais.
Rede de canais e condutos	Determinístico	Comportamento e otimização	Otimiza o diâmetro dos condutos e verifica as condições de projeto.	Rede de abastecimento de água; rede de irrigação.

### Quadro 1 – Continuação

Operação de reservatórios	Estocástico; Determinístico	Comportamento e otimização	Determina a operação ótima de sistemas de reservatórios.	Usos múltiplos.
Planejamento e gestão de sistemas múltiplos	Estocástico; Determinístico	Comportamento, otimização e planejamento	Simula condições de projeto e operação de sistemas (usa vários modelos)	Reservatórios, canais, estações de tratamento, irrigação, navegação fluvial.

#### 3.1.1. Modelos Precipitação–Vazão

Os modelos precipitação-vazão simulam a resposta do escoamento superficial para várias escalas de tempo: eventos e balanço hídrico sendo que, os dados necessários são obtidos por meio do monitoramento de bacias hidrográficas, exigindo esforços (monetários e técnicos) durante longos períodos de tempo. Assim, a aplicação desses modelos é restrita pela escassez de dados compatíveis com a simulação desejada (CEBALHOS e SCHNABEL, 1998).

As condições da superfície das bacias hidrográficas (florestas, campos agrícolas, áreas urbanas) têm ênfase no processo de geração do escoamento, fazendo com que a formulação conceitual dos modelos precipitação-vazão considere tais características.

Segundo TUCCI (1998), a estrutura dos modelos hidrológicos de precipitação – vazão é baseada nos elementos: (1) discretização da bacia hidrográfica, (2) variáveis de entrada, (3) estrutura básica da integração dos processos, (4) aquisição de dados físicos das bacias, (5) determinação dos parâmetros.

Quanto à discretização da bacia, o modelo pode ser global (toda bacia é representada por uma precipitação média e os processos hidrológicos por variáveis concentradas no espaço); distribuídos por sub-bacias; distribuído por módulos, onde a discretização é realizada por formas geométricas sem relação direta com a forma da bacia, mas caracterizando internamente os componentes dos processos.

As principais variáveis de entradas são a precipitação e a evapotranspiração sendo que, incertezas na precipitação constituem a maior fonte de erro no uso destes modelos. Devido à escassez de dados de evapotranspiração, normalmente são feitas estimativas dos valores desta variável.

A integração dos processos dentro da estrutura do modelo pode ser feita considerando a bacia ou um canal. Na primeira alternativa, o modelo simula o balanço vertical dos fluxos e o escoamento na sub-bacia ou módulo. Na segunda, o modelo simula escoamento em rios e canais definidos, propagando a vazão de montante e recebendo a contribuição do módulo da bacia.

A aquisição dos dados físicos da bacia pode ser por meio de um modelo digital do terreno (MDT), onde os pontos altimétricos são ajustados a um modelo que representa a morfologia do terreno, ou, pelo Sistema de Informação Geográfica (SIG) no qual os parâmetros do modelo hidrológico são estimados com base nos horizontes do solo, cobertura vegetal, uso do solo e outras características físicas. Os dados numéricos que integram o MDT podem ser do tipo vetorial, onde a cada ponto correspondem três valores (dois são coordenadas de posição e terceiro, a respectiva cota), ou *raster*, onde os pontos cotados dispõem-se regularmente formando os centros de gravidade de células quadradas dispostas em uma malha regular.

De acordo com MOORE e GRAYSON (1991), existem três formas principais de estruturar uma rede de dados de elevação: por redes triangulares irregulares (TIN); redes de grid; e redes baseadas em vetor ou curva de nível. Os Modelos de Elevação Digital (DEM) ou Modelos Numéricos de Terreno (MNT) são baseados na forma mais comum de armazenamento de dados, o mapa topográfico. As curvas de nível são representadas no vetor DEM por uma série de coordenadas x,y (sistema de coordenadas cartesianas no plano horizontal) para cada isolinha de elevação. O espaçamento dos pontos x,y pode ser tanto regular como irregular, sendo que o último exige menos armazenamento de dados para um determinado nível de precisão. Espaçamentos irregulares permitem que áreas com contornos relativamente retos sejam digitalizadas com espaçamento mais largo que áreas cujo contorno tenha maior curvatura. Os mapas topográficos são preparados diretamente de fotografias aéreas ou levantamento de campo de modo que a informação seja submetida a um mínimo de manipulações, minimizando, assim, os erros. As maiores desvantagens desses métodos são que a digitalização é relativamente demorada e as exigências para o armazenamento de dados são maiores do que para os métodos de grid ou para os TINs. A densidade de informação do vetor DEM é maior em áreas com inclinações íngremes do que em áreas mais planas, onde a topografia não é tão bem definida.

Quanto aos parâmetros do modelo, uns são estimados com base nas características físicas e outros, devem ser ajustados de acordo com dados observados das variáveis de entrada e saída.

Conceitualmente, os modelos precipitação-vazão podem ser classificados como: empíricos, conceituais, físico-distribuídos. Segundo as relações existentes ou estabelecidas entre as entradas e saídas, os modelos empíricos podem ser lineares ou não-lineares, sendo que, de acordo com MOTA (1999), a linearidade é, em hidrologia, uma hipótese muito atraente em virtude das simplificações que se produzem nos tipos de cálculos, mas na maioria das vezes estas hipóteses carecem de uma realidade física. Contrariamente, a aproximação conceitual considera menos o empirismo, e trata de definir, por análises, os diferentes elementos que integram o processo físico, assim como suas relações internas. Os modelos conceituais usam a equação da continuidade, associada a uma ou mais equações empíricas que relacionam variáveis e parâmetros dos processos (TUCCI, 1998). Os modelos físico-distribuídos utilizam a equação da continuidade e dinâmica dos processos envolvidos, buscando integrar a descrição de todos os processos físicos que ocorrem na bacia, porém apresentam maiores dificuldades devido a grande variabilidade das características físicas e dos processos (TUCCI, 1998).

Os modelos precipitação-vazão também podem ser classificados, segundo TUCCI (1998), quanto aos usos e objetivos como modelos que simulam condições estacionárias na bacia e tem como objetivo obter um bom ajuste no hidrograma de saída (por exemplo, determinação da vazão máxima), ou, modelos que simulam alterações na bacia e no comportamento dos processos hidrológicos e buscam o conhecimento distribuído dos fenômenos na bacia (por exemplo, simulação do comportamento da bacia devido ao uso rural em conjunto com modelos de sedimentos químicos na estimativa de poluição difusa).

Os modelos ANSWERS, HEC-HMS (Hydrologic Modeling System, desenvolvido pelo Hydrologic Engineering Center), IHACRES, IPH, SCS, SHETRAN, SMAP (Soil Moisture Accounting Procedure), SHE (Système Hydrologique Européen), SSARR, STANFORD IV, SWAT (Soil and Water assessment Tool), TOPMODEL, TOPOG (TOPGraphy model), VBC (Variable Bucket Capacity), entre outros, são alguns exemplos de modelos precipitação-vazão.

### 3.1.2. Modelos distribuídos

A escolha do modelo para a simulação de processos hidrológicos em bacias depende do objetivo, da precisão desejada, da disponibilidade e da qualidade de dados. Dois tipos de modelos podem ser considerados com relação à representação espacial da simulação: os modelos globais e os modelos distribuídos. Os modelos hidrológicos globais consideram a superfície geográfica sem admitir as particularidades locais. A bacia é tratada como uma entidade homogênea que apresenta características uniformes em toda a área (FLEMING, 1977). Segundo VILLENEUVE *et al.* (1986), há alguns anos, modelos conceituais distribuídos vêm sendo desenvolvidos em substituição aos modelos empíricos anteriormente utilizados, em função de sua maior complexidade devida à utilização de informações espacialmente distribuídas, para a representação sistemática de diferentes processos hidrológicos.

Nos modelos hidrológicos distribuídos a simulação resulta da integração das funções locais sobre toda a área geográfica da bacia. A representação da variação espacial dos processos hidrológicos utilizada nesses modelos subdivide a bacia em um grande número de elementos finitos. Os cálculos são feitos para cada elemento, baseados nas características individuais e, a resposta total é calculada pela integração dos incrementos de cada elemento finito (FLEMING, 1977).

Os modelos utilizados no estudo de bacias hidrográficas e que se baseiam em parâmetros acumulados necessitam, para sua calibração, de dados meteorológicos e hidrológicos coletados durante um tempo suficientemente longo, que nem sempre estão disponíveis. Esses modelos geralmente não utilizam dados como topografia, tipo de solo, padrões e mudanças dos tipos de vegetação. Por outro lado, os modelos distribuídos baseados em aspectos físicos podem superar muitas dessas deficiências por meio do uso de parâmetros que possuem uma interpretação física e por sua representação da variabilidade espacial nos valores dos parâmetros (BEVEN, 1989).

De acordo com WIGMOSTA *et al.* (1994), uma das vantagens da utilização dos modelos distribuídos é seu potencial de simulação mais preciso do processo de escoamento superficial, fortemente influenciado pelas variações espaciais das principais características do terreno como, por exemplo, clima, características do solo, vegetação e topografia. No entanto, tal precisão somente será possível se o modelo for bem desenhado e operado, obtendo-se



assim vantagem de sua capacidade de representação espacial dos processos envolvidos. Outro aspecto significativo a ser ressaltado é que esses modelos tornam possível simular a influência de modificações projetadas para o uso da terra de uma bacia (LARSON *et al.*, 1982). A predição das alterações resultantes de mudanças naturais ou antrópicas sobre os padrões de vegetação, qualidade da água e produção de escoamento superficial exige uma representação explícita e acurada das relações entre hidrologia, vegetação e clima. Em regiões montanhosas, características do terreno como topografia, vegetação e solos apresentam grande variação espacial, assim como os fatores meteorológicos (precipitação, velocidade do vento, etc.). A absorção de radiação solar é altamente dependente da topografia local. Essas heterogeneidades em pequena escala causam impacto na redistribuição da umidade do solo, na produção de escoamento superficial e no balanço de energia da superfície do solo. Na avaliação dos efeitos de fenômenos naturais como mudança climática, ou dos impactos das atividades humanas incluindo desmatamento, agricultura e urbanização essas informações podem ser críticas (WIGMOSTA *et al.*, 1994).

Segundo LARSON *et al.* (1982), os modelos distribuídos são mais desejáveis que os globais, porém apresentam custo adicional em termos de complexidade do modelo e exigência de dados de entrada. A importância desses pontos depende de vários fatores, incluindo tamanho da bacia, número de sub-áreas necessário e estrutura do modelo.

Geralmente são utilizados mapas de diversos tipos, estabelecidos a partir de levantamentos de campo, de fotointerpretação, de imagens de satélite ou de qualquer outra fonte de informação geográfica para representar a informação espacial necessária aos modelos distribuídos. Dentre os diferentes parâmetros de descrição da área de uma bacia, a topografia apresenta papel primordial, equivalendo à maneira mais simples de definir a paisagem e permitindo avaliar as características da drenagem numa região. Além da topografia, devem-se conhecer os diferentes tipos de solo que compõem a área da bacia, bem como o tipo de ocupação do solo, uma vez que esses fatores também influenciam as características do escoamento superficial, da capacidade de infiltração da água no solo e da evapotranspiração.

Os modelos distribuídos apresentaram uma forte evolução nos últimos anos em função do desenvolvimento dos sistemas de gestão de base de dados, dos Sistemas de Informação Geográfica, dos modelos numéricos de terreno e da aplicação de sensoriamento remoto (ROUET, 1991; BONN e ROCHON, 1992; LAURINI e MILLERET-RAFFORT, 1993).

Não obstante da acentuada evolução e da ampliação da utilização dos modelos hidrológicos distribuídos, BEVEN (1989) salienta a importância de manter uma postura crítica com relação a esses modelos, bem como a qualquer representação simplificada da realidade. Ainda, segundo o autor são dois os objetivos principais dos modelos de simulação. O primeiro refere-se a explorar as implicações de se fazer certas suposições sobre a natureza do sistema do mundo real; o segundo, prever o comportamento do sistema do mundo real sob uma série de circunstâncias naturais. As aplicações dos modelos físicos têm-se ocupado principalmente do primeiro objetivo com a finalidade de aumentar a compreensão de uma determinada construção teórica. Por analogia, também estaria sendo expandida a compreensão do protótipo do mundo real. Todavia, tais conclusões devem ser tomadas com grande cuidado. Os modelos de simulação, até mesmo os mais complexos, apresentam extremas simplificações da realidade. É sabido que as equações utilizadas nos modelos descrevem bem os processos que ocorrem em laboratório, em bacias e encostas modelo que são bem definidas e espacialmente homogêneas. Não se pode estar tão seguro de que essas equações descrevam o sistema tridimensional complexo, espacialmente heterogêneo e temporalmente variável que é uma bacia hidrográfica real (BEVEN, 1989).

Segundo BERGSTRÖM (1991), durante as duas últimas décadas, os modelos matemáticos se tornaram ferramentas aceitas em hidrologia. Modelos distribuídos são freqüentemente considerados superiores aos globais uma vez que necessitam menos calibrações ou ajustes dos parâmetros. Contudo existe um limite no desempenho que não pode ser superado nem mesmo pela mais completa descrição física. Esse limite é dado pela precisão e representatividade dos dados de entrada. Importantes variáveis como precipitação e evapotranspiração, estão sujeitas a erros sistemáticos grandes que não podem ser corrigidos satisfatoriamente antes de serem usados como entradas do modelo. Também é de conhecimento que a geologia, topografia e uso da terra são altamente variáveis na maioria das bacias e até mesmo variam muito dentro da célula da malha empregada como unidade de área em muitos modelos distribuídos.

De maneira resumida, DE BRIEVE e TIMBE (2002) apresentam uma relação de informações que são requeridas para implementação de um modelo hidrológico distribuído, tendo como exemplos os modelos SWAT, MIKE SHE e TOPMODEL. Os autores ressaltam que o termo “distribuído” refere-se, neste contexto, a todos os parâmetros da bacia

hidrográfica que neste tipo de modelo podem ser representados com sua variação espacial (basicamente por meio de mapas destes parâmetros). Segue as informações:

- 1) Informação geral: topografia digital (escala mínima 1:25.000); limite da área de estudo;
- 2) Informação meteorológica: localização das estações, séries de tempo de chuva, séries de tempo de evapotranspiração ou dados para cálculo da mesma;
- 3) Informação da cobertura vegetal: distribuição espacial da cobertura do solo (padrão de vegetação), série de tempo de Índice de Área Foliar (IAF), série de tempo da profundidade das raízes, coeficiente de distribuição de raízes, coeficiente de capacidade de interceptação;
- 4) Informação do fluxo superficial e o do sistema fluvial (necessária quando se deseja analisar níveis de rios): fluxo superficial, coeficiente de Manning, nível inicial da água na superfície, coeficiente de capacidade de retenção na superfície, sistema fluvial, localização do sistema fluvial, vertedouros e diques, seções transversais dos rios ou canais, nível e volumes nas fronteiras, série de tempo de vazão; e
- 5) Informação de solos na zona saturada e não-saturada: distribuição e espessura dos perfis de água do solo na bacia, áreas impermeáveis, caracterização hidrofísica do solo (retenção de água, condutividade hidráulica), série de tempo do conteúdo de umidade para cada solo, áreas e constantes de fluxo “*bypass*”, informação geológica, condutividade hidráulica saturada (vertical e horizontal), profundidade de drenagem, séries de tempo do nível freático.

## **3.2. TOPMODEL**

### **3.2.1. Conceituação**

TOPMODEL (*Topography Based Hydrological Model*), modelo desenvolvido por BEVEN E KIRKBY (1979), é um modelo conceitual e semidistribuído de transformação de chuva em vazão, que relaciona a formação de escoamento superficial à área variável de distribuição. Os fatores determinantes do escoamento superficial são representados pela topografia do terreno e por uma lei exponencial que relaciona a transmissividade com a profundidade do solo, medida a partir de sua superfície (VARELLA e CAMPANA, 2000).

De acordo com CRISTOFOLETTI (1999) o TOPMODEL é um conjunto de instrumentos conceituais que podem ser utilizados para simular processos hidrológicos de maneira relativamente simples, principalmente no que se refere à dinâmica das áreas contribuintes superficiais ou subsuperficiais.

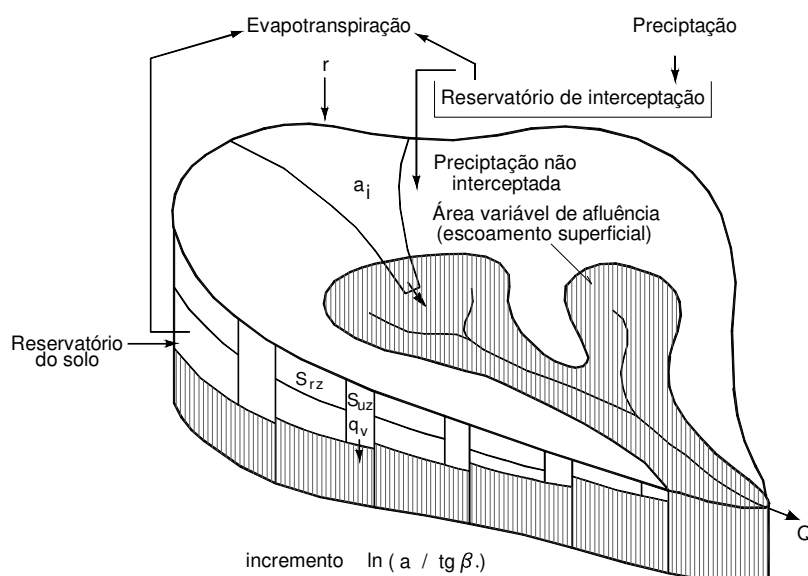
Segundo FRANCHINI *et al.* 1996, em modelos conceituais chuva-vazão podem ser identificados dois componentes: balanço hídrico do solo e transferência de todas as formas de escoamento para o deflúvio na saída da bacia. O TOPMODEL é caracterizado pelo balanço hídrico do solo, parte mais importante, sendo que, o componente de transferência é dividido em duas fases: uma que representa a transferência ao longo das encostas em direção aos cursos d'água e outra, que representa a transferência ao longo da rede de drenagem até a saída da bacia.

O modelo faz uso do princípio de conservação de massa, ou seja, a taxa de entrada menos a taxa de fluxo de saída é igual à taxa de variação de armazenamento, para vários “reservatórios” em uma bacia como ilustrado na figura 1.

O reservatório de interceptação é abastecido pela chuva e sua capacidade depende do tipo de cobertura vegetal. Este reservatório tem como saídas a evaporação e a precipitação não-interceptada, a qual se transforma em entrada do reservatório do solo. O balanço hídrico no reservatório do solo é calculado, também, pela equação de conservação de massa. O balanço hídrico da bacia é obtido somando as equações de balanço hídrico de todos os reservatórios da bacia (SANTOS, 2001).

O TOPMODEL realiza os cálculos de balanço hídrico em um conjunto de células definidas topograficamente e usa a Lei de Darcy para calcular os fluxos de água no solo. Tomando por consideração um segmento de bacia hidrográfica definido por um corte pela

curva de nível na parte inferior e por dois cortes perpendiculares às curvas de nível até o divisor da bacia (figura 1), tem-se que a precipitação não-interceptada ( $p$ ) cai no segmento de área  $A$  e profundidade  $D$ ; uma parcela,  $R$ , infiltra. O escoamento subsuperficial do segmento ocorre à taxa  $q_b$ . O escoamento superficial,  $q_s$ , decorre de áreas saturadas (escoamento superficial por saturação). A declividade local no ponto de saída,  $\beta$ , é considerada como sendo

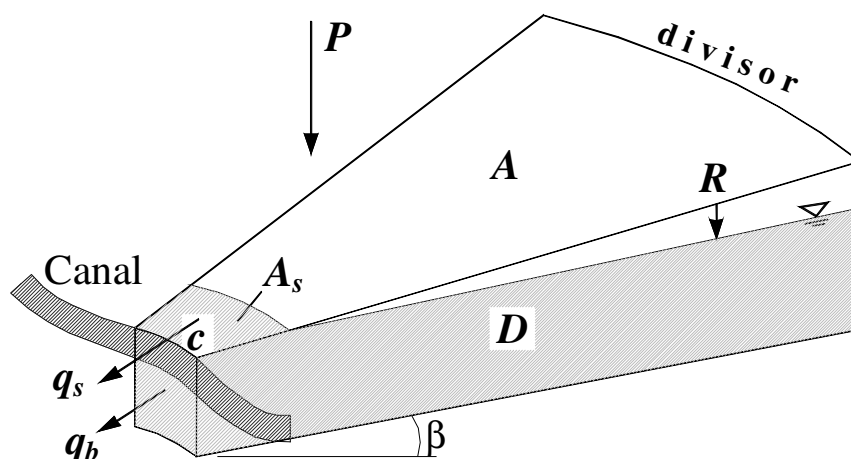


igual à declividade da superfície freática (RANZINI, 2002).

**Figura 1** – Diagrama esquemático do conceito do TOPMODEL e características da discretização do modelo (Fonte: Adaptado de TUCCI, 1998 e SANTOS, 2001)

Como no TOPMODEL é suposto que o fluxo é direcionado pela topografia, o segmento apresentado na figura 2 representa uma parte da rede de fluxo da bacia. O fluxo de água subsuperficial é fortemente condicionado pela topografia local. O grau de convergência das linhas de fluxo (linhas perpendiculares às curvas de nível) determina quanto da área de encosta é drenado por unidade de comprimento do contorno para certo ponto. Declividade local, espessura do solo e condutividade hidráulica do solo determinam a capacidade do solo para conduzir a água para jusante a partir de um determinado ponto. O escoamento superficial saturado ocorre em áreas onde existe acúmulo de escoamento subsuperficial – pontos para onde drenam grandes áreas da encosta (encostas convergentes ou depressões) e, onde a

capacidade de drenar água para jusante é limitada (declividades suaves na base da encosta). Os fluxos podem ser determinados aplicando-se a conservação de massa ao segmento da figura 2 (RANZINI, 2002).



**Figura 2** - Balanço hídrico de um segmento de encosta da bacia hidrográfica (Fonte: SANTOS, 2001).

### 3.2.2. Teoria

A formulação do modelo TOPMODEL faz uso de relações físicas para reproduzir o comportamento de alguns dos processos hidrológicos e também para representar a bacia hidrográfica. A base conceitual do modelo tem como seus principais componentes: armazenamentos e fluxos na zona não-saturada, armazenamentos e fluxos na zona saturada, e propagação do fluxo na sub-bacia. A descrição detalhada é apresentada a seguir e está apoiada nos trabalhos de MINE e CLARKE (1996), TUCCI (1998), SANTOS (2001) e RANZINI (2002).

O TOPMODEL está baseado nas seguintes premissas básicas: 1) a dinâmica da zona saturada pode ser obtida por sucessivas representações de estados uniformes; 2) o gradiente hidráulico da zona saturada pode ser obtido pela declividade da topografia local,  $\text{tg}\beta$ . Estas premissas geram relações simples entre o armazenamento na bacia (ou déficit de armazenamento) e níveis locais da lâmina de água (ou déficit de armazenamento devido à drenagem) cujo fator principal é o índice topográfico  $a/\text{tg}\beta$ , primeiramente proposto por

KIRKBY em 1975. O índice topográfico é utilizado como índice de similaridade hidrológica, fazendo com que o modelo assuma que todos os pontos que possuem o mesmo valor do índice apresentem resposta hidrológicamente similar. Uma terceira hipótese diz respeito à distribuição da transmissividade com a profundidade, como sendo uma função exponencial do déficit de armazenamento ou da profundidade do lençol de água. O modelo assume que dentro do intervalo de tempo existe homogeneidade espacial da taxa de recarga que contribui para a área saturada.

De acordo com a terceira hipótese, a transmissividade (T) do solo ( $m^2/h$ ), no sentido vertical, é expressa por:

$$T = T_0 e^{-S/m} \quad (1)$$

sendo  $T_0$  é a transmissividade quando o solo está saturado ( $m^2/h$ ),  $S$  é o déficit de armazenamento (m) e,  $m$  é um parâmetro que governa a taxa de diminuição da transmissividade com a profundidade. Esta equação pode ser expressa em função do nível do lençol freático como:

$$T = T_0 e^{-fz} \quad (2)$$

na qual  $z$  é a profundidade da lâmina de água saturada (lençol freático, m) e,  $f$  é um parâmetro de escala ( $m^{-1}$ ). Os parâmetros  $f$  e  $m$  estão relacionados, aproximadamente, por  $f = \Delta_{\theta 1} / m$ ; sendo  $\Delta_{\theta 1}$  é a variação da taxa de água efetiva por unidade de profundidade na zona não-saturada devido a uma rápida drenagem por gravidade. O parâmetro “ $m$ ” controla a profundidade efetiva do perfil da bacia. Um grande valor de “ $m$ ” aumenta a área ativa do perfil do solo onde a água flutua.

Pela segunda hipótese, a vazão da zona saturada por unidade de comprimento do contorno ( $q$ ) de cada ponto  $i$  em um cabeceira é dada por:

$$q_i = (T_0 t g \beta)_i e^{fz_i} \quad (3)$$

Baseando-se na quarta hipótese, a vazão do fluxo subsuperficial para uma unidade de contorno  $i$ , com recarga  $r$  (mm/h) é:

$$q_i = r_i \cdot a_i \quad (4)$$

sendo  $a_i$  a área da bacia que contribui para o fluxo superficial na zona saturada.

Combinado as equações 3 e 4 é possível isolar a profundidade  $z_i$  em função dos outros fatores, como segue:

$$z_i = -\frac{1}{f} \ln \frac{r \cdot a}{T_0 \text{tg}\beta} \quad (5)$$

A equação (5) faz a relação entre a profundidade local da superfície freática ao índice topográfico, definido por  $\ln(a/\text{tg}\beta_i)$ , o parâmetro de escala  $f$ , a taxa de recarga  $r$  e, a transmissividade máxima  $T_{0i}$ .

Integrando a equação (5) para toda a bacia, obtém-se a profundidade média ( $\bar{z}$ ) sobre a bacia de área  $A$  que contribui para a área saturada:

$$\bar{z} = \frac{1}{A} \sum -\frac{1}{f} \ln \frac{r \cdot a}{T_0 \text{tg}\beta} \quad (6)$$

Considerando a recarga ( $r$ ) espacialmente uniforme, portanto constante, e combinando as equações (5) e (6) essa variável é eliminada, resultando na seguinte equação:

$$\bar{z} = z_i - \frac{1}{f} \left[ \gamma - \ln \frac{a}{T_0 \text{tg}\beta} \right] \quad (7)$$

sendo  $\gamma = \frac{1}{A} \sum \ln \frac{a}{T_0 \text{tg}\beta}$ ; sendo que o termo  $\ln[a/(T_0 \cdot \text{tg}\beta)]$  é denominado índice solo-topográfico.

A transmissividade média ( $\bar{T}$ ) é obtida pela expressão:

$$\ln \bar{T} = \frac{1}{A} \sum \ln T_0 \quad (8)$$

Com a expressão (8) e reescrevendo a equação (7) tem-se:

$$f(\bar{z} - z_i) = \left[ \ln \frac{a}{\text{tg}\beta} - \lambda \right] - [\ln T_0 - \ln \bar{T}] \quad (9)$$

na qual  $\lambda = \frac{1}{A} \sum \ln \frac{a}{\text{tg}\beta}$ .

Considerando o déficit de armazenamento médio da bacia como sendo  $\bar{S} = m \cdot f \cdot \bar{z}$ , a equação (9) pode ser expressa como:

$$\frac{(\bar{S} - S_i)}{m} = \left[ \ln \frac{a}{\text{tg}\beta} - \lambda \right] - [\ln T_0 - \ln \bar{T}] \quad (10)$$

De acordo com TUCCI (1998), a equação (9) expressa a relação entre a profundidade média do lençol freático e uma profundidade local  $i$ , em qualquer ponto, em função da

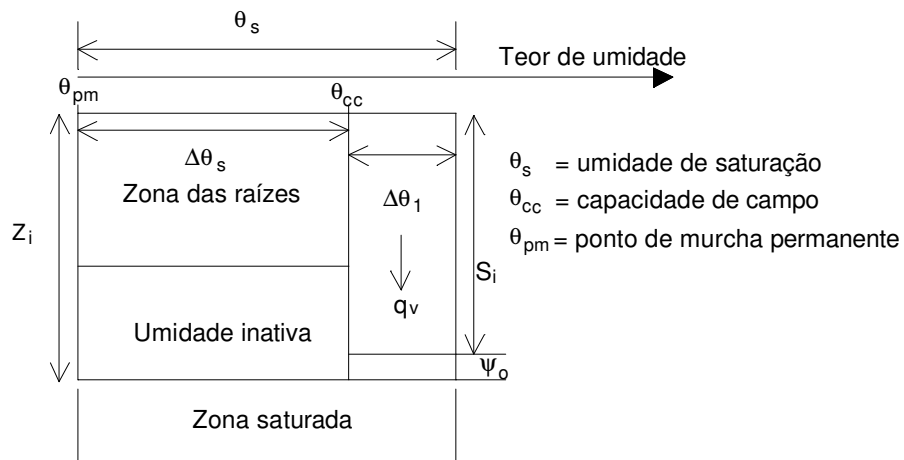


diferença entre o índice topográfico local e seu valor médio menos a diferença entre o logaritmo da transmissividade local e seu valor médio espacial.

Tendo conhecimento do valor do déficit de armazenamento ou da profundidade do lençol freático, podem-se estimar os valores em diferentes locais da bacia tendo como base a distribuição espacial do índice  $a/T_0tg\beta$  sendo que, pontos que apresentam o mesmo valor deste índice funcionam de maneira idêntica. É denominada similaridade hidrológica.

O fator  $a/tg\beta$  pode ser obtido a partir da topografia do terreno uma vez que, fazendo uso de modelos digitais do terreno torna-se possível estimar a distribuição espacial deste fator por classes, em toda a bacia. Assim, o modelo trata a bacia por classes de índice que apresentam o mesmo comportamento.

O modelo apresenta os processos de armazenamento organizados baseado na caracterização da bacia como ilustrada na figura 3, sendo que a área  $a_i$  contribui para o fluxo superficial na área saturada (em destaque); o armazenamento da área não-saturada é denominado  $S_{rz}$ ;  $S_{uz}$  é o armazenamento na área de drenagem que percola para a zona saturada;  $q_v$  é a vazão de recarga do lençol freático;  $\Psi_0$  representa a franja capilar. O armazenamento no subsolo apresenta em sua estrutura uma zona de raízes, uma região de umidade inativa e o fluxo de percolação para a zona saturada (figura 3).



**Figura 3** – Representação esquemática dos armazenamentos de água no perfil do solo (Fonte: Adaptado de TUCCI, 1998)

O conceito de capacidade de campo é refletido por meio da noção de zona de água do solo não-ativa. Quando a capacidade de campo é satisfeita, o fluxo vertical da zona de raízes para a lâmina de água pode ocorrer na zona de drenagem, por gravidade. Para converter o déficit de armazenamento devido à drenagem em altura de lâmina de água, assume-se que a drenagem rápida afeta somente os poros maiores, abaixo da capacidade de campo e a diferença entre a saturação e a capacidade de campo não é alterada com a profundidade, resultando em uma escala linear simples:

$$\begin{aligned} S_i &= (\theta_s - \theta_{cc})(z_i - \psi_0) \\ S_i &= \Delta\theta(z_i - \psi_0) \end{aligned} \quad (11)$$

sendo  $S_i$  o déficit de armazenamento da drenagem por gravidade;  $\psi_0$  é a profundidade da franja capilar.

A vazão de percolação ( $q_v$ ) pode ser obtida por meio de uma proporção da condutividade hidráulica vertical do solo ( $K$ ),  $q_v = \alpha K$ , ou, considerando a hipótese de decaimento exponencial da condutividade em função da profundidade da superfície freática:

$$q_v = \alpha K_0 e^{-\beta z_i} \quad (12)$$

na qual  $\alpha$  é o parâmetro que representa o gradiente hidráulico vertical efetivo,  $K_0$  é a condutividade saturada na superfície e  $z_i$ , a profundidade local do lençol freático.

A evapotranspiração real ( $E_a$ ) é calculada como sendo uma função da evapotranspiração potencial ( $E_p$ ) e da umidade armazenada na zona das raízes. A evaporação real é igual a potencial plena para áreas saturadas e para a água que escoar direto na zona não-saturada. A evapotranspiração é retirada da zona radicular baseada na expressão:

$$E_a = E_p \left( 1 - \frac{S_{rz}}{S_{r\max}} \right) \quad (13)$$

onde  $S_{rz}$  representa o déficit de umidade da zona das raízes e  $S_{r\max}$ , o déficit máximo na zona radicular, o qual pode ser calculado pela expressão:

$$S_{rz} = z_{rz}(\theta_{cc} - \theta_{pm}) = z_{rz}(\Delta\theta_2) \quad (14)$$

sendo  $\theta_{pm}$  o teor de umidade no ponto de murcha permanente;  $\theta_{cc}$  representa o teor de umidade na capacidade de campo e  $z_{rz}$ , a profundidade da zona radicular.

Sendo  $q_v$  o fluxo de água que entra no aquífero, para se obter a média do balanço de água faz-se necessário somar todas as recargas. Considerando  $Q_v$  como a recarga total para o aquífero, tem-se:

$$Q_v = \sum_{i=1}^n q_{vi} A_i \quad (15)$$

sendo  $A_i$  representa a área associada à classe  $i$  do índice topográfico como uma fração da área total.

A saída de água pela zona saturada é dada pela vazão de base  $Q_b$ , calculada de forma distribuída pela soma do fluxo subsuperficial junto a cada um dos  $r$  trechos do canal de comprimento  $l$ :

$$Q_b = \sum_{j=1}^r l_j (T_0 t g \beta) e^{-fz_i} \quad (16)$$

Substituindo  $z_j$  por meio da equação (7) e reorganizando, obtém-se:

$$Q_b = \sum_{j=1}^r l_j a_j e^{-\gamma} e^{-f\bar{z}} \quad (17)$$

sendo que  $a_j$  representa área de contribuição por unidade de comprimento, portanto:

$$\sum_{j=1}^r l_j a_j = A \quad (18)$$

Substituindo a equação (18) na (17) tem-se:

$$Q_b = A e^{-\gamma} e^{-f\bar{z}} \quad (19)$$

na qual  $A$  é a área total da bacia em  $m^2$ . Por esta equação pode-se determinar a vazão de saída do escoamento de base em função da profundidade média do aquífero da bacia.

Definindo a descarga quando  $\bar{z}$  ou  $\bar{S}$  é igual a zero como sendo:

$$Q_0 = A e^{-\gamma} \quad (20)$$

Assim, a vazão total de saída de água pela bacia resulta em:

$$Q_b = Q_0 e^{-f\bar{z}} \quad (21)$$

A solução da equação (21) para uma recessão sem entrada de água é uma função inversa com o tempo, expressa por:

$$\frac{1}{Q_b} = \frac{1}{Q_0} + \frac{1}{m} \quad (22)$$

Sendo a equação (22) apropriada para representar o escoamento de base de uma dada bacia, plotando o valor inverso ( $1/Q_b$ ) em função do tempo deve-se obter um gráfico linear. A declividade da reta é  $1/m$ , o que permite estimar este parâmetro a partir de algumas recessões, desde que não influenciadas fortemente pela evaporação (BEVEN *et al.*, 1995a citado por RANZINI, 2002).

A atualização do déficit de armazenamento médio na sub-bacia, antes de cada intervalo de tempo, é efetuada subtraindo a recarga da zona saturada e, adicionando a vazão de base calculada no intervalo de tempo anterior, ou seja:

$$\bar{z}_t = \bar{z}_{t-1} + \Delta\theta_1 [Q_{b(t-1)} - Q_{v(t-1)}] \quad (23)$$

sendo  $\Delta\theta_1 = \theta_s - \theta_{cc}$ .

Se a vazão de saída for conhecida e igual à vazão de base, pode-se determinar o valor do armazenamento médio da bacia no primeiro intervalo de tempo por meio da equação 23.

Considerando que o escoamento direto não alcança o exutório da bacia em um mesmo momento, o que ocasiona um atraso no hidrograma, foi incluído no modelo uma rotina simples para a propagação do escoamento direto (RANZINI, 2002). Assim, o escoamento na bacia é propagado segundo uma função distância-resposta. O tempo de um determinado ponto até a saída pode ser obtido por:

$$t = \sum_{i=1}^N \frac{x_i}{vtg\beta_i} \quad (24)$$

em que  $x_i$  é o comprimento e  $tg\beta_i$ , a declividade do segmento  $i$  de um caminho de fluxo compreendendo  $N$  segmentos entre a célula  $i$  e o exutório;  $v$  é o parâmetro velocidade (m/h), adotado como sendo constante. Esta equação possibilita estabelecer o histograma tempo-área para uma bacia hidrográfica.

### 3.2.3. Estudos e Aplicações

A metodologia do modelo tem sido alterada por vários autores e tem evoluído de acordo com os problemas tratados em diferentes realidades (TUCCI, 1998). A seguir são apresentados alguns estudos e aplicações do modelo TOPMODEL encontrados na literatura.

WOOD *et al.* (1988) realizaram uma investigação preliminar sobre a existência de uma AER - Área Elementar Representativa (*Representative Elementary Area - REA*) no contexto da modelagem hidrológica em escala de bacia hidrográfica. O estudo foi desenvolvido para

uma topografia real de bacia representada pela bacia experimental do Rio Coweeta, Carolina do Norte-EUA, com área de 17km<sup>2</sup>. A resposta hidrológica da bacia foi modelada por uma versão modificada e espacialmente distribuída do TOPMODEL capaz de modelar tanto o excesso de infiltração como o escoamento superficial do excesso de saturação e também incorporar a variabilidade espacial dos solos, topografia e precipitação. Estava disponível um mapa de elevação digital com grid de 30m<sup>2</sup>. A bacia foi subdividida em quatro níveis de desagregação resultando na subdivisão da bacia em 87, 39, 19 e 3 sub-bacias. O próximo passo na análise foi formular um modelo de resposta hidrológica na escala do pixel (30m<sup>2</sup>). A atenção foi concentrada na resposta de precipitação de tempestade e exigiu um modelo que pudesse lidar com importantes processos na geração de escoamento superficial. Os resultados obtidos foram divididos em três grupos: (1) solos, precipitação e topografia variáveis que formam um conjunto o mais próximo da resposta natural da bacia; (2) solos e precipitação espacialmente constantes com topografia variável; e (3) solos e precipitação espacialmente variáveis, com produção de escoamento superficial por excesso de infiltração apenas. Realmente existe uma Área Elementar Representativa no contexto da resposta da geração de escoamento superficial de bacias hidrográficas. Os autores concluíram que: (1) realmente existe uma Área Elementar Representativa no contexto da resposta da geração de escoamento superficial de bacias hidrográficas; (2) a AER é fortemente influenciada pela topografia, por (a) tamanho e forma das sub-bacias e (b) seu papel no modelo de resposta hidrológica; (3) as variabilidades das entradas de solos e precipitação entre sub-bacias apresentam papel secundário na determinação do tamanho da AER; no entanto, um aumento ou diminuição dessas variabilidades aumenta ou diminui a variabilidade entre sub-bacias.

QUINN *et al.* (1991) analisaram alguns problemas da derivação de caminhos de fluxo de dados digitais raster do terreno no contexto de estimativas hidrológicas utilizando o TOPMODEL, considerando que a precisão das estimativas de modelos hidrológicos distribuídos deve depender, em parte, da especificação apropriada dos caminhos de fluxo. O modelo foi aplicado na bacia Booro-Borotou (1,36km<sup>2</sup>), Reino Unido. Os autores afirmam que a armação do TOPMODEL fornece um método parametricamente simples de utilização de dados digitais do terreno para prever mudanças no desenho do nível de água, mas é dependente da validade das hipóteses de fluxo quase estável e da derivação de uma distribuição apropriada do  $\ln(a/tg\beta)$  a partir de dados do modelo digital do terreno. O estudo

mostrou que a resolução do grid pode refletir características que são vitais à resposta hidrológica, podendo ser uma escala mais sutil que a escala de 50m comumente disponível.

ROBSON *et al.* (1993) aplicaram o TOPMODEL, em duas bacias em Balquhidder, Escócia, com o objetivo de (1) comparar a resposta hidrológica das duas bacias, (2) relacionar essas respostas aos mecanismos de geração de fluxo que operam nas bacias, e (3) considerar os efeitos que mudanças no uso da terra possam ter ocasionado. Um modelo numérico de terreno foi produzido para avaliação do índice  $\ln(a/tg\beta)$ . Esse mapa foi gerado em escala  $100m \times 100m$  por interpolação a partir das curvas de nível de um mapa 1:10.000. A área,  $a$ , usada nesse índice, representa a área da bacia que drena através de uma dada célula. Essas áreas são acumuladas no sentido descendente da bacia até atingirem a calha principal. Mapas dos valores dos índices mostram que as bacias são diferentes em termos da distribuição espacial de  $\ln(a/tg\beta)$ . Em geral, os mapas de índices correspondem bem às impressões da umidade da bacia obtidas por experiência de campo. Os resultados indicam que uma grande parcela da água na calha é gerada de áreas de contribuição saturadas (áreas fonte), sendo que a bacia Monachyle tem maiores contribuições de água desse tipo. Os resultados também indicam que a hidrologia da bacia Monachyle vem mudando seguindo o melhoramento agrícola pelo aumento da drenagem.

IORGULESCU e JORDAN (1994) aplicaram o modelo TOPMODEL a duas sub-bacias pertencentes à bacia Haute-Mentue, localizada na região do Platô Suíço, cerca de 20km distante de Lausanne. A bacia apresenta área de  $12,5km^2$  e altitudes variando de 930m a 694m. A inclinação média é de  $4^\circ$ . Predominam os cambissolos, e a camada de solo tem profundidade de 1m. A bacia tem 55% de sua área coberta com floresta, sendo o restante utilizado para agricultura com plantações variadas e pastagem perene. Foram utilizadas células de grid de 5m e 10m para um modelo numérico de terreno derivado de curvas de nível de 1m de equidistância. Células de grid de 10m e 25m foram utilizadas para um modelo numérico do terreno desenvolvido a partir de curvas de nível com 10m de equidistância de um mapa topográfico com escala 1:50.000. Mesmo para a estrutura simples do TOPMODEL com exigências de entradas limitadas, a interação entre os parâmetros pode levar a diferentes mecanismos modelados e interações físicas. Diferenças entre os mecanismos dominantes de geração de escoamento superficial nas bacias não puderam ser explicados completamente. Os resultados do modelo foram compatíveis com investigações de campo, sugerindo que a

topografia é relevante, mas não suficiente para desconsiderar fatores geológicos e de solo em determinadas áreas saturadas.

ZHANG e MONTGOMERY (1994) utilizaram dados digitais de elevação de alta resolução de duas pequenas bacias hidrográficas para examinar o efeito do tamanho do grid do modelo de elevação digital na representação da superfície do solo e simulações hidrológicas. Os dados de elevação foram divididos em escalas de grid de 2m, 4m, 10m, 30m e 90m para gerar uma série de paisagens simuladas. As distribuições de frequência de inclinação ( $\text{tg}\beta$ ), área de drenagem por comprimento das curvas de nível ( $a$ ), e o índice topográfico ( $a/\text{tg}\beta$ ) foram calculadas para cada modelo de tamanho de célula. As distribuições de frequência de  $a/\text{tg}\beta$  foram então usadas para predição de zonas de saturação superficial e para simular hidrogramas no TOPMODEL. A primeira área estudada apresentava  $0,3\text{km}^2$  e as inclinações variavam de  $30^\circ$  a  $40^\circ$ . Apesar de se ter observado muita discrepância entre esse mapa e a superfície do solo, assumiu-se que esses dados forneciam uma representação precisa da superfície do solo. A outra bacia ocupava uma área de  $1,2\text{km}^2$ , com inclinações variando entre  $20^\circ$  a  $30^\circ$ . Investigações de campo revelaram que os dados forneciam excelente representação da superfície do solo. Os dados de elevação das células das duas bacias geraram malhas de 2m, 4m, 10m, 30m e 90m utilizando o módulo de grid do programa ARC/INFO. Os resultados indicaram que não é razoável usar tamanho de grid de 30m ou 90m para modelar vertentes ou processos de geração de escoamento superficial em topografias moderadas a íngremes sem que seja feita efetuada calibração do modelo. Enquanto um grid de 10m representa um avanço sobre grids de 30m ou maiores, tamanhos menores de grid fornecem relativamente pouca resolução adicional. Os autores concluíram que um tamanho de grid de 10m representa uma razoável relação entre resoluções espaciais crescentes e exigências de manuseio de dados para a modelagem de processos superficiais em grande número de paisagens.

Uma vez que a validação das previsões espaciais do TOPMODEL pode ser afetada pelo algoritmo usado para calcular o índice topográfico do modelo, QUINN *et al.* (1995) estudaram alguns métodos de análise digital do terreno para uso no cálculo deste índice. O desenho espacial e a distribuição estatística do índice mostraram-se ser substancialmente diferente para procedimentos de cálculo distintos e resoluções divergentes. Foi constatado que uma interação entre acúmulo de área contribuinte de encosta e a definição analítica da rede do canal apresenta influência nos desenhos do índice calculado. Os autores executaram testes

com análises digitais do terreno a fim de explorar esta interação. Os testes sugerem que um “ótimo” limiar de início de canal pode ser definido pelo posicionamento de cabeceiras de rios no raster do modelo digital do terreno. Os resultados mostram que este limiar é dependente da resolução do grid do modelo digital do terreno. A resolução do grid também apresenta implicações para a validação espacial das previsões do modelo, implicando que conjuntos de parâmetros “ótimos” do TOPMODEL podem ser únicos para a escala de grid usada em sua derivação.

WOLOCK (1995) analisou os efeitos do tamanho da sub-bacia nas características topográficas de uma bacia hidrográfica de 111,5km<sup>2</sup> em Vermont (EUA) utilizando o modelo hídrico TOPMODEL. A média e a variância da distribuição de  $\ln(a/tg\beta)$  foram computadas para vários conjuntos de sub-bacias (0,05km<sup>2</sup> a 111,5km<sup>2</sup>) ao longo das correntes na bacia e usados como *input* do modelo. Em geral, as estatísticas da distribuição da função logarítmica e a porcentagem simulada do fluxo superficial no fluxo total aumentaram rapidamente para algumas sub-bacias e decresceram rapidamente para outras, à medida que o tamanho da sub-bacia aumentava de 0,05km<sup>2</sup> até 1km<sup>2</sup>, e em geral aumentaram para um tamanho de sub-bacia de 5km<sup>2</sup>, e permaneceram relativamente constantes para um tamanho de sub-bacia maior que 5km<sup>2</sup>. Os resultados do estudo demonstram a existência de padrões nos efeitos do tamanho da sub-bacia sobre as estatísticas de distribuição da função logarítmica e sobre as trilhas de fluxos simulados pelo TOPMODEL para a bacia do Rio Sleepers. Os resultados indicam que uma sub-bacia deve ter uma área de pelo menos 5km<sup>2</sup> para que possa ser considerada representativa, em termos de características topográficas e redes de fluxo simuladas, de sub-bacias maiores ao longo da mesma corrente. Os autores salientam que se deve tomar cuidado na extrapolação de áreas de pesquisa pequenas (menores que 1km<sup>2</sup>) para áreas maiores.

AMBROISE *et al.* (1996) apresentaram duas formas alternativas de índice topográfico e de índice solo-topográfico, baseados em funções hiperbólica de 2<sup>a</sup> ordem e exponencial, uma vez que estudos preliminares da aplicação do TOPMODEL, na bacia Ringelbach (36ha), sugeriram que a forma original da função exponencial de transmissividade, conduzindo ao índice topográfico e a curva de recessão hiperbólica de 1<sup>a</sup> ordem do fluxo de base, não é apropriada para esta bacia. Os resultados indicam que os novos índices podem ser usados, assim como o original, para relacionar profundidade média do lençol freático à profundidade local do lenço para que avaliações dos desenhos de saturação possam ser executadas. Os



autores afirmam que uma análise de uma curva de recessão da bacia fornece uma indicação de qual tipo de função é apropriada para representar o comportamento bacia-escala.

BOYER *et al.* (1996) investigaram os mecanismos hidrológicos que controlam a variação do carbono orgânico dissolvido (COD) na bacia montanhosa Deer Creek, Montezuma, Colorado, EUA. A bacia apresenta elevação variando de 3350m a 4120m e sua área drenada é de 10,6km<sup>2</sup>. No período de julho de 1991 a agosto de 1992 foram examinados os mecanismos hidrológicos para explicar a variabilidade do COD através da simulação da resposta da bacia usando o modelo TOPMODEL. Foram levantados dados diários de descarga, coletadas amostras de água da parte superior do solo, sendo diárias quando do início do derretimento de neve e semanal durante o verão. Para o uso do modelo, o índice topográfico foi calculado por meio de dados do modelo digital de elevação descrito em Wolock (1993). A calibração foi efetuada usando o algoritmo Rosenbrock otimizado tendo como parâmetros: 1) a taxa de decréscimo da condutividade hidráulica com a profundidade dividida pela porosidade; 2) condutividade hidráulica da superfície do solo; 3) temperatura limiar para o derretimento da neve; 4) taxa máxima de derretimento para temperatura média diária. Nenhuma vazão simulada pelo TOPMODEL bem como nenhum valor de COD simulado podem ser considerados como a representação perfeita dos dados. Todavia, os resultados dos modelos são, em geral, consistentes com os dados disponíveis do local. Aconselha-se que propriedades do solo em adição à topografia poderiam ser consideradas no refinamento do modelo conceitual.

FRANCHINI *et al.* (1996) realizaram uma interpretação física e análise de sensibilidade do modelo TOPMODEL, e também apresentaram alguns exemplos de aplicação real do modelo. Uma das regiões analisadas foi a bacia Sieve, Itália, com área de aproximadamente 840km<sup>2</sup>. Nessa bacia foram utilizados dados de chuvas horárias e descargas, do período de 01/12/1959 a 31/03/1960, bem como modelo digital de elevação com tamanho de grid de 400m. A calibração do modelo foi feita com os dados do mês de dezembro, resultando nos seguintes valores de parâmetros:  $f = 66,67\text{m}^{-1}$ ,  $K_0 = 650\text{km/m}$  e  $SR_{\text{max}} = 0,002\text{m}$ . A calibração foi baseada no sistema de tentativa e erro, envolvendo apenas os três parâmetros citados. O teste de validação foi executado usando os dados dos meses de janeiro, fevereiro e março. Os autores afirmam que, comparando o TOPMODEL a outros modelos, o primeiro apresenta resultados ligeiramente melhores em termos de calibração e

validação. A partir da simulação da bacia de Sieve, foi realizado um estudo envolvendo 16 bacias da região da Toscana (Itália), 4 da região do Reno e 1 bacia do Real Collobrie (França), para as quais foram elaborados modelos de elevação digital com o mesmo tamanho de grid (400m). Foram mantidos constantes os valores dos parâmetros  $f$ ,  $K_0$  e  $SR_{max}$  (valores obtidos para a bacia de Sieve) e executadas novas simulações, as quais apontaram a falta de sensibilidade do modelo para a curva índice atual da bacia. A partir daí, outros testes foram realizados utilizando-se outros tamanhos de grid. O modelo foi então calibrado usando o grid de 60m, resultando nos valores de parâmetros:  $f = 58,8m^{-1}$ ,  $K_0 = 35km/m$  e  $SR_{max} = 0,022m$ . Os valores de  $f$  e  $SR_{max}$  foram mantidos constantes e, usando cada outra curva índice computada de um aumento no tamanho do grid, o parâmetro  $K_0$  foi calibrado. Os autores concluíram que o TOPMODEL deve ser relacionado e usado basicamente como área de contribuição variável, modelo conceitual chuva-escoamento, bem como caracterizado pelos três parâmetros ( $f$ ,  $K_0$  e  $SR_{max}$ ), o que leva a uma calibração muito simplificada e fácil, em relação a outros modelos conceituais.

MINE e CLARK (1996) testaram o TOPMODEL na bacia hidrográfica do rio Belém, objetivando explorar seu potencial quando aplicado em situações onde não se dispõem de informações qualitativas e/ou quantitativas suficientes. A bacia do rio Belém localiza-se na cidade de Porto Velho, Paraná, Brasil, e sua área é de  $42km^2$ . O clima local é classificado como subtropical, úmido, mesotérmico com geadas severas e sem estação seca; a precipitação média anual é de 1400mm; a evapotranspiração potencial média é de 1000mm e a média real é de 900mm. A altitude varia de 1010m na cabeceira a 874,4m na exutória. A estimativa da quantidade de água retida em pequenas depressões ou interceptada pela vegetação foi de 7,5mm para áreas permeáveis e 2,5mm para áreas impermeáveis. Para intensidade de infiltração foi adotada 25mm/h para primeira meia hora de precipitação e 15mm/h para segunda meia hora até o final. A área de estudo foi dividida em duas sub-bacias: a do rio Belém rural ( $3,53km^2$ ) e a do rio Belém urbano ( $38,47km^2$ ). O modelo foi testado em 8 enchentes ocorridas em 1986, sendo que a enchente de 13/08/1986 serviu de base para calibração. Dados mensais de evapotranspiração, calculadas por Penman, foram transformados em horários dividindo-os pelo número de dias do mês e depois, dividindo por 11 horas para concentrá-la nas horas de maior insolação (das 7 às 17 horas). Os resultados mostraram que a

eficiência média do ajuste do modelo ficou bem abaixo do que é recomendado pela literatura, porém para enchentes maiores, a eficiência atingiu valores superiores a 80%.

BEVEN (1997) faz uma análise crítica a respeito de algumas questões envolvidas na aplicação dos conceitos do TOPMODEL com o objetivo de provocar uma abordagem cuidadosa em relação a modelos hidrológicos e da interação entre trabalho de campo e construção do modelo. O autor classifica como “aplicações desatentas” do TOPMODEL quando o mesmo é utilizado em situações onde as suposições do modelo são totalmente inválidas ou onde a distribuição de  $a/tg\beta$  é derivada usando um grid de elevação com um espaçamento maior que as encostas da bacia. Seriam também aplicações nas quais o modelo é usado apenas como uma função de produção não-linear com otimização simples de valores de parâmetros em contraste com algum registro de descarga observado, mas nos quais qualquer valor de parâmetro pode ser bastante sem sentido. O autor afirma que uma boa calibração para registros de descarga não significa necessariamente que os conceitos do modelo são apropriados para aplicação em uma bacia, podendo ser necessário avaliar outros significados. É destacado que valores de parâmetros calibrados e a faixa de valores que fornecem formas aceitáveis para as observações, necessariamente refletem as fontes de erro no processo de modelagem. A falta de conhecimento dos caminhos de fluxo de subsuperfície e a heterogeneidade das características hidráulicas também têm efeito na calibração do modelo. O autor conclui afirmando que a quantidade de artigos publicados indica a variedade de aplicações dos conceitos do TOPMODEL, as quais revelam os sucessos e dificuldades da modelagem hidrológica e, particularmente, da modelagem hidrológica distribuída. BEVEN espera que o incentivo a modelagem “pensativa” proporcionada pelos conceitos do TOPMODEL resulte em melhora no entendimento entre o processo de modelagem e os valores dos dados, bem como em avaliação das incertezas associadas à previsão hidrológica.

BLAZKOVA e BEVEN (1997) aplicaram uma versão de simulador estocástico de chuva utilizado junto com o TOPMODEL, para estimar a curva de frequência de vazões para condições de pouca disponibilidade de dados de descarga disponíveis, em três bacias (1,87km<sup>2</sup>, 4,75 km<sup>2</sup>, 25,81 km<sup>2</sup>) nas Montanhas Jizera, República Tcheca. O modelo diferencia eventos de alta e baixa intensidade. Os resultados estatísticos foram verificados comparando-os com dados mensurados. Contrastou-se a curva de frequência de inundação modelada com estimativas regionais ou séries medidas para curtos períodos de retorno e

usadas para prever longos períodos de retorno para curva de inundação. O único parâmetro do TOPMODEL ajustado foi a transmissividade média efetiva. Para as duas bacias menores o parâmetro chuva foi ajustado de acordo com o tamanho da bacia. Os resultados mostraram que a seqüência de chuvas pode ter efeito significativo na previsão do evento em período de retorno de 100 anos, igualmente para simulações de 1000 anos e sem considerar incerteza nos parâmetros do modelo de chuva.

COLES *et al.* (1997) citados por FERREIRA (2004), aplicaram o TOPMODEL em pequenas bacias rurais na região produtora de trigo da Austrália com o objetivo de quantificar a geração de escoamento. Intensidade de chuva, propriedades do solo e topografia foram avaliados para determinar sua influência na variabilidade e sua possibilidade de mensuração pelo modelo TOPMODEL. As simulações mostram que melhores formas entre as hidrógrafas observadas e simuladas foram obtidas com chuvas mais intensas, em oposição aos eventos menos severos e de maior frequência. O escoamento apresentou-se altamente heterogêneo em relação às escalas espacial e temporal. A análise das simulações em sistemas sob diferentes manejos do solo demonstrou que as bacias ocupadas com pastagem geraram maiores picos de fluxos médios e volumes de vazão que às aquelas cultivadas com culturas. Os autores concluíram que a resposta do escoamento foi governada pela variabilidade espacial das propriedades do solo e topografia, sendo a variação temporal associada à intensidade da chuva.

HOLKO e LEPISTÖ (1997) utilizaram o modelo TOPMODEL para simular o comportamento hidrológico de uma bacia montanhosa do ribeirão Jalovecky, Eslováquia. A bacia tem área de 22,1km<sup>2</sup>, elevação média de 1500m, inclinação média de 28°, a vegetação engloba florestas dos Alpes, campinas e cobertura rochosa aberta. A precipitação média é de 1435mm, o escoamento médio é de 858mm e a média anual de temperatura a 1500m é de 3,5°C. O objetivo dos autores foi testar a aplicabilidade do modelo para simulação do escoamento em determinadas bacias, comparar frações de áreas saturadas calculadas pelo TOPMODEL e pelo método isotópico. Foram analisados dados diários do escoamento no período de 1 de agosto de 1987 a 31 de outubro de 1993 e, dados horários do período de 15 de agosto de 1993 a 07 de setembro de 1993. A precipitação diária foi estimada a partir do total medido semanalmente nas estações meteorológicas próximas (8km da saída da bacia). Os escoamentos diários foram baseados nos registros do nível de água de hora em hora, medidos na saída da bacia. A evapotranspiração potencial foi estimada pelo método de Thorntwaite,

sendo que os totais mensais foram divididos pelo número de dias para se obter os valores diários. A temperatura média diária foi calculada a partir da medida horária para elevação média da bacia. O índice topográfico foi calculado por meio do programa gridTAB (parte integrante do modelo TOPMODEL), com dados topográficos de um mapa escala 1:10.000 e tamanho do grid de 100m. No modelo foram incluídos dados para o processamento da neve, calculou o excesso de infiltração e considerou a interceptação. A simulação em longo prazo foi relativamente bem sucedida, embora eventos particulares de escoamento não tenham sido sempre simulados satisfatoriamente. Os autores consideraram boas as simulações de escoamento apesar da estrutura relativamente simples do modelo TOPMODEL e do fato de que algumas das afirmações do mesmo possam não ser válidas para a bacia (por exemplo, perfil homogêneo do solo). As simulações de curto prazo apresentaram resultados promissores do ponto de vista da realidade do tamanho da área saturada, como verificado pelo método da separação isotópica. Os autores apontam que serão necessários mais esforços para a realização da simulação por meio do escoamento total simulado para o período todo.

SAULNIER *et al.* (1997a) analisaram os dados de elevação raster dentro da estrutura do TOPMODEL. Foi demonstrado que o algoritmo usado no processamento dos pixels do canal para cálculo do índice topográfico  $= \ln(a/tg\beta)$  pode ter efeito dramático sobre a sensibilidade dos valores de parâmetro efetivos ao tamanho do grid. A dependência existente entre a escala do grid e os valores de parâmetro efetivos em modelos hidrológicos distribuídos foi reconhecida no passado, mas não é bem compreendida. O rápido aumento no poder computacional e na disponibilidade de sistemas de informação geográfica e mapas digitais de terreno têm encorajado o uso de modelos distribuídos.

Segundo SAULNIER *et al.* (1997b), o TOPMODEL foi uma das primeiras tentativas de resposta para o modelo hidrológico distribuído baseado nos conceitos de área variável de afluência e, faz uso de um índice de similaridade hidrológica baseada na análise de dados topográficos. O índice proposto foi generalizado para considerar a variabilidade espacial da transmissividade do solo, mas não apresenta nenhuma análise da variabilidade espacial da taxa de decréscimo da transmissividade com a profundidade. Os autores estudaram a sensibilidade das respostas previstas à variabilidade da profundidade efetiva do solo. O estudo foi realizado na bacia Maurets (8,4km<sup>2</sup>), uma sub-bacia pertencente à bacia experimental do Réal Collobrier (71km<sup>2</sup>), localizada no sul da França. As altitudes variam de 209m a 770m. A vegetação é

tipicamente mediterrânea, com uma mistura de florestas e vegetação rasteira. Foi preparado um mapa de elevação digital com resolução de 20m, pela digitalização de curvas de nível de 10m de intervalo de um mapa em escala 1:25.000. A versão inicial do TOPMODEL aplicada à bacia Maurets foi uma versão baseada em evento, considerando homogeneidade de solos em toda a bacia. Foram testados dois tipos muito diferentes de padrões de profundidade efetiva do solo. Como primeiro teste de sensibilidade, assumiu-se que os valores efetivos eram uma função linear decrescente da elevação. Foi conduzida uma segunda análise, na qual a variabilidade espacial efetiva das profundidades do solo foi considerada uma função linear decrescente da inclinação topográfica. Uma justificativa para esse tipo de função pode ser feita com base no maior potencial de erosão em inclinações mais acentuadas. Os resultados mostraram como a heterogeneidade da profundidade efetiva do solo pode ser incorporada facilmente na estrutura do TOPMODEL, resultando em uma equação modificada para prever o déficit de saturação local.

SIVAPALAN *et al.* (1997) apresentam uma representação da capacidade variável de armazenamento (VBC) do TOPMODEL (BEVEN E KIRKBY, 1979), generalizando o esquema de “armazenamentos simples” de Manabe utilizado em modelos climáticos. Ao fazer isso, foram motivados pelo modelo de capacidade de infiltração variável (VIC) apresentado por WOOD *et al.* (1992). Em relação às bacias, ou partes da superfície da terra, cuja hidrologia se encaixa as hipóteses do TOPMODEL, esta versão generalizada oferece uma representação alternativa que pode ser utilizada como o ponto de partida para modelos de hidrologia de superfície terrestre em amplas escalas espaciais. O modelo é primeiramente aplicado, com resultados satisfatórios, a uma pequena bacia (26,1km<sup>2</sup>) próxima de Camberra na Austrália. O modelo foi inicialmente implementado sob hipóteses de chuva espacialmente uniforme, para uma parte da bacia experimental de Lockyersleigh previamente estudada por KALMA *et al.* (1995). O objetivo era estimar os parâmetros do modelo baseado em séries temporais de chuva-escoamento, e em medidas de umidade do solo feitas em vários pontos dentro da bacia, em intervalos aproximadamente quinzenais de um período de 3,5 anos. Depois de completada a fase de calibração, o modelo pôde então ser usado como um ponto de partida para investigar os efeitos da heterogeneidade espacial da chuva e da umidade do solo resultante, sobre um longo período de balanço hídrico da superfície de terra em grandes escalas espaciais. Neste caminho, as heterogeneidades de subgrid dos processos hidrológicos

são tomadas implicitamente usando a estrutura do modelo VBC, enquanto o efeito da maior escala de heterogeneidade de chuva entre sub-bacias é modelado explicitamente. A variabilidade subgrid da chuva, especialmente a cobertura parcial que caracteriza os eventos da chuva nessas amplas escalas, é considerado como a causadora de influências significativas na estimativa das simulações dos fluxos de superfície terrestre. Outras manifestações dos efeitos da variabilidade espacial da chuva foram da mesma forma investigados, também através de simulações de modelos, porém a fim de obter *insights* para desenvolver parametrizações simples dos fluxos de superfície terrestre em amplas escalas. Isso inclui a investigação da dinâmica, ou seja, variabilidade espacial e temporal, do estado da umidade do solo variável durante e após um evento de chuva. Ademais, os relacionamentos empíricos associando a variável de afluência, o escoamento de superfície e evaporação, em relação a uma variável do estado da umidade do solo (por exemplo, a armazenagem de umidade do solo) originam-se com base nas simulações de modelo, e os efeitos da variabilidade da chuva subgrid nesses relacionamentos são examinados. Devido à forte não-linearidade inerente às descrições de processo dentro do modelo, os relacionamentos “constitutivos” supracitados são fortemente afetados pela heterogeneidade da chuva.

BRASINGTON e RICHARDS (1998) avaliaram a dependência de escala do modelo TOPMODEL em bacia de cabeceira nas Montanhas Médias do Nepal. Análises digitais do terreno foram usadas para calcular frequência de distribuição de inclinação ( $\text{tg}\beta$ ), área contribuinte de aclave ( $a$ ) e o índice hidrológico combinado  $\ln(a/\text{tg}\beta)$  para uma faixa de modelo de elevação digital com tamanhos de grid entre 20m e 500m. Os autores observaram que as distribuições resultantes do índice topográfico são fortemente sensíveis ao tamanho do grid, nos quais estimativas variáveis da área contribuinte de aclave são identificadas como o controle de primeira ordem. Análises de sensibilidade revelaram que as previsões do modelo são conseqüentemente dependentes do tamanho do grid, ainda que este efeito possa ser modulado pela recalibração do parâmetro condutividade hidráulica saturada do modelo como mudanças no tamanho do grid. Uma ligação analítica entre este parâmetro e a forma da distribuição de probabilidade do índice foi testada e mostrou-se ser confiável para uma ampla faixa de escalas. Uma mudança significativa na resposta do modelo para escala foi identificada em tamanhos de grid de 100m e 200m. Esta mudança no tamanho do grid é marcada também pela rápida deterioração da informação topográfica contida no modelo de elevação digital,

medida em termos de entropia estatística. Os autores sugerem que esta quebra na relação de escala corresponde a comprimentos de encosta típicos em terrenos dissecados, e esta escala marca, desta maneira, um fundamental limiar natural para aplicações baseadas em modelo de elevação digital.

CEBALLOS e SCHNABEL (1998) aplicaram o TOPMODEL na bacia Guadalperalon, Espanha, com o objetivo de identificar os processos hidrológicos, explicar a variação do escoamento superficial em relação às características de chuva e umidade antecedente. A bacia é de 2ª ordem e possui as seguintes características: área de 0,35km<sup>2</sup>; elevação média de 378m; 1,93km/km<sup>2</sup> de densidade de drenagem; 4,7% de gradiente do canal; 685m de comprimento do canal. O solo apresenta profundidade média de 20cm, porosidade de 51,5% e densidade global de 1,26g/cm<sup>3</sup> na camada de 0 – 5cm. O clima local é mediterrâneo com temperatura média de 16°C, invernos moderados e verões quentes e secos. Precipitação anual média é de 512mm, distribuída em mais de 85 dias. Vegetação predominante: Quercus rotundifolia sendo que na bacia a densidade é de 5 a 45 árvores/ha e no vale predominam as plantas herbáceas. Principal atividade: rebanho de ovelhas e gado. Na bacia foram identificadas três unidades: 1) superfície de erosão (áreas com rampas inferiores a 9%; profundidade do solo 10 – 40cm; não é representativa da bacia); 2) rampas inclinadas (rampas entre 10 e 37%; profundidade do solo 0 – 30cm; porosidade média de 47,5%); 3) fundo do vale (Regossolos, porosidade média de 58%; gradiente de rampa não excede 4%; vegetação herbácea). A precipitação incidente foi medida por cubas basculantes (0,2mm de resolução com intervalos de 5min) conectadas a um sistema de aquisição de dados e, por pluviômetro instalado próximo a área (diâmetro de 15,2mm). A vazão foi medida em uma estação com capacidade de descarga máxima de 0,86m/s<sup>3</sup>; o sensor de profundidade fornecia média de descarga em intervalos de 5min. O conteúdo de água (medido pelo método gravimétrico usando cilindro de 5cm de altura e volume de 98,12cm<sup>3</sup>), a porosidade e a densidade global do solo foram medidos em vários pontos representativos da variabilidade espacial da bacia. Os autores consideraram que a entrada de água (chuva) é igual à saída (evapotranspiração e fluxo sobre o solo) e que o armazenamento de água é igual no começo e fim do estudo. Assim,  $P = E_A + R + \Delta SM$  sendo: P é a precipitação;  $E_A$  é a evapotranspiração real (medida a partir do conteúdo de chuva e descarga pelo método de Escarré et al. (1986); R representa o escoamento e  $\Delta SM$ , a umidade do solo. A zona saturada foi determinada por duas maneiras: 1) baseada na interpretação de



fotos aéreas e trabalhos de campo; 2) usando o índice topográfico para aplicação do TOPMODEL, resultou em valores diferentes para o tamanho da área variável (11,55% pela interpretação de fotos e 24,9% aplicando o índice topográfico). O período de análise abrangeu os anos hidrológicos de 1991 e 1992 para dados de precipitação e descarga, e 1993 e 1994 com um pequeno número de hidrógrafos. Os autores concluíram que o fluxo do canal depende das condições de umidade antecedente e da retenção de água pelos sedimentos do fundo do vale e que, a variabilidade do coeficiente de escoamento anual não é explicada apenas pelo total de chuva anual, mas depende fortemente da distribuição da precipitação durante o ano hidrológico.

SCHULER (1998) avaliou a possibilidade de aplicação do modelo TOPMODEL em uma bacia de mesoescala sob condições de clima subtropical. A bacia estudada apresenta área de aproximadamente 59km<sup>2</sup> e é pertencente à região administrativa de Analândia, São Paulo. O clima local é classificado como subtropical ou mesotérmico, seco no inverno e chuvoso no verão, sendo a média de precipitação anual de 1228mm. A temperatura média anual é de 19,5°C. Prevalece o tipo de relevo caracterizado por morretes alongados e espigões, e a altimetria varia de 660m a 1058m. Na bacia predominam os solos Podzólicos Vermelho Amarelo (43%) seguidos pelos Latossolos Vermelho Amarelo (22,1%), Litólicos (13,4%) e Latossolos Roxos (13,4%). A cobertura vegetal predominante são pastagens, cultivo de cana e citrus, com presença de pequenos fragmentos de matas e campos sujos de cerrado. Foram realizados estudos de campo para determinação dos valores físicos do modelo e posteriormente, realizou-se a análise de sensibilidade do modelo aos diferentes parâmetros, fazendo uso de dados dos anos hídricos de agosto de 1992 a julho de 1994. Foram realizadas simulações em períodos quinzenais e também com eventos isolados, com duração de 20 a 80 horas. O modelo digital de elevação foi obtido a partir de um mapa topográfico na escala 1:50.000 e deste modelo se obteve o índice topográfico em um grid com resolução de 20m x 20m. Registros horários de precipitação e vazão foram obtidos junto ao CTH/DAEE. Os valores diários da evapotranspiração potencial foram estimados usando o método de Linacre (1977). Em campo foram determinados os parâmetros: condutividade hidráulica saturada, granulometria, saturação máxima, capacidade de campo e ponto de murcha permanente. Os resultados apontaram a possibilidade de simular a vazão pelo TOPMODEL, uma vez identificados os parâmetros efetivos e as limitações relacionadas à representatividade física

dos valores calibrados dos parâmetros. Essas limitações referem-se às condições de contorno como dados de precipitação e evapotranspiração, que não representam a variabilidade espacial da bacia.

VAN HERPE *et al.* (1998) analisaram a aplicação de um modelo conceitual de transporte de nitrato em 2 bacias rurais, considerando que a contaminação de águas superficiais e do lençol freático por nutrientes, em especial por nitratos, é uma típica fonte de poluição não-pontual em áreas agrícolas. Geralmente, os modelos compreendem um mecanismo complexo de aproximação, integrando todos os processos envolvidos na lixiviação do nitrato por meio de equações matemáticas fisicamente baseadas. O uso de modelos distribuídos para modelamento da bacia requer considerável quantidade de dados os quais tornam seu uso caro e consomem muito tempo para serem amplamente adaptados para propostas de manejo da água. Os autores afirmam que um conceito de modelo simples promove uma fácil análise dos efeitos de interação dos parâmetros, enquanto permanece em um nível de contabilidade sensível para os parâmetros ambientais que são variáveis no tempo e no espaço. Afirmam ainda que, o TOPMODEL assume um relacionamento simples entre o armazenamento na bacia (déficit de armazenagem) e o nível do lençol freático local, no qual o fator controlador é a topografia do terreno e, reconhecem que pouco se sabe sobre o potencial do TOPMODEL para simulações de fluxo de nitrato.

Com o objetivo de identificar e caracterizar a zona ripária de uma microbacia, ZAKIA (1998) aplicou o modelo MESS (modelo de escoamento superficial de autoria de RIGHETTO (1997)) concebido a partir do TOPMODEL para simular vazão e utilizou o programa AVA. EXE (também derivado do TOPMODEL) para determinar a área de afluência variável, com dados de uma microbacia de 62ha localizada na área de reserva florestal da Fazenda São Nicolau, município de Arapoti, PR, denominada microbacia experimental da Onça. O clima local é uma transição do clima mesotérmico, sem estação seca e com verões quentes, e do clima mesotérmico úmido a subúmido, sem estação seca, mas com verões frescos. A precipitação média anual para os anos de 1983 a 1996 é de 1465mm. A temperatura média anual do período mais quente varia de 22,3°C a 23,6°C; as temperaturas mínimas variam de 2°C a 3°C. Na microbacia foi instalada uma estação limimétrica (vertedor e linígrafo) para medida contínua do deflúvio. A microbacia apresenta as seguintes características morfométricas: 3400m de perímetro; bacia de 2ª ordem; declividade média de 18,3%; 1200m

de comprimento do canal principal. Dados de precipitação foram obtidos de um pluviógrafo de rotação diária, instalado a 5km da bacia. Para determinação do balanço hídrico anual foi utilizada a equação:  $P - Q - ET \pm \Delta S = 0$ , sendo P representa a precipitação; Q, a vazão; ET é a evapotranspiração e  $\Delta S$ , a variação da umidade do solo. Como para o período de um ano  $\Delta S$  pode ser considerado igual a zero, a equação resume-se a:  $P - Q - ET = 0$ . Os resultados para o período de um ano (1994/1995) foram:  $Q = 261\text{mm}$ ;  $ET = 1159\text{mm}$ ;  $P = 1422\text{mm}$ . Quanto ao uso do modelo MESS, a discretização da microbacia em células de 5m x 5m permitiu a identificação da zona ripária (10,4% da área total da bacia) bem como a simulação da vazão para um período de 3 meses de dados horários. A autora afirma que embora o modelo MESS ainda necessite de aprimoramento, o mesmo mostrou-se adequado para simular vazões, otimizando os parâmetros condutividade hidráulica, coeficiente de escoamento e fator de decaimento do hidrograma.

DONNELLY-MAKOWECKI e MOORE (1999) examinaram se o tempo de resposta da função semidistribuída usada no TOPMODEL proporciona um desempenho superior em pequenas bacias florestadas temperadas comparando com a representação de reservatórios globais de rotina de escoamento similar àqueles empregados em modelos hidrológicos da bacia. Foram empregadas duas alternativas de modelos globais: uma trata a bacia como tendo dois reservatórios em paralelo (um rápido e um lento); a outra considera três reservatórios em série, estruturados para representar o modelo percentual do processo de escoamento baseado nas observações de campo e, apresentam um modelo de armazenagem de cobertura que simula interceptação, queda direta e escoamento pelo tronco. Os autores também determinaram a significância estatística dos diferentes modelos executados, combinando ANOVA com o procedimento de Jackknife. Foram escolhidas duas bacias a 50km oeste de Vancouver, Canadá, dentro da área da Universidade de Pesquisas Florestais British Columbia. As bacias apresentam as seguintes características: 1) área de 38,3ha, 93% coberta com floresta primária, elevação variando de 280m a 447m; 2) área de 19,8ha, 100% coberta com floresta primária, elevação de 175m a 319m. O clima local é úmido com inverno temperado e fresco, e verão relativamente seco. Precipitação média anual varia de 2000 a 2500mm, dos quais 70% ocorrem entre outubro e abril. Cobertura florestal predominante é o henlock (*Tsuga heterophylla*). O solo apresenta textura grosseira, sendo classificado como Podzol humo-ferríco, com condutância hidráulica variando de  $10^{-4}$  a  $10^{-3}\text{m/s}$  no interior do solo e  $10^{-7}$  a

$10^{-6}$ m/s na camada cultivada subjacente. Foram usados os dados da estação climática localizada na sede da Universidade de Pesquisas Florestais, extrapolados para cada bacia e usados na entrada do modelo de armazenamento da cobertura. Dados de quatro pluviômetros instalados em clareiras externas a cada bacia cuja coleta de dados ocorria a cada duas semanas, durante o período de setembro de 1994 a junho de 1995, foram utilizados para comparar com dados da sede. Para o escoamento pelo tronco foram geradas medidas em intervalos de 10 minutos e os valores foram integrados na forma de médias horárias. Para análise dos eventos de chuva–escoamento foram utilizadas precipitações de intensidade inferior a 0,1mm/h, separadas de pelo menos 6h. Os valores de índice topográfico foram derivados do modelo de elevação digital, gerado por digitalização de mapa topográfico em escala 1:5000. O grid adotado foi de 10m. O modelo de armazenamento da cobertura foi baseado no modelo analítico de Gash (1979). A contribuição do fluxo de subsuperfície e superficial, calculados pelo TOPMODEL foram similares para ambas as bacias, 95 – 97% e 3 - 5%, respectivamente. Os autores concluíram que o TOPMODEL apresentou desempenho estatisticamente melhor que os métodos globais usados nas bacias e indicam que o TOPMODEL não é melhor nem pior que os outros dois modelos, quando transportado geograficamente e climaticamente, mas pode se comportar melhor em algumas bacias.

RODHE e SEIBERT (1999), considerando que informações a respeito das distribuições da umidade do solo são necessárias para agregação dos modelos de transferência-solo-vegetação-atmosfera, investigaram a possibilidade de prever as distribuições do umedecimento nas bacias a partir de dados topográficos utilizando índices topográficos, principalmente o índice TOPMODEL. Os índices foram calculados a partir de dados de grid (50m x 50m) comercialmente disponíveis em duas áreas com topografias contrastantes: 1) bacia Nasten (6,6km<sup>2</sup>) na região de baixo relevo NOPEX no sul da Suécia, onde a altitude máxima é de 55m e a mínima é 18m, declividade média é de 0,03, precipitação média anual é de 660mm e o escoamento médio anual é de 203mm; 2) um grupo de bacias em uma área montanhosa no centro da Suécia, denominado Kassjöan (164km<sup>2</sup>), com altitude variando entre 227m e 532m, declividade média de 0,06, precipitação média anual de 700mm e escoamento médio anual de 350mm. A ocorrência de áreas alagadas, que representam o final do umedecimento extremo do espectro de umidade, foi utilizada como dado de campo. Foi observado que as distribuições de frequência de índices topográficos para áreas alagadas e não

alagadas foi claramente diferente em Kassjöan, embora houvesse uma ampla sobreposição, considerando que as distribuições foram bem similares em Nasten. A previsão de áreas alagadas a partir dos índices topográficos foi significativa apenas em Kassjöan. Apesar de ter proporcionado resultados pobres em termos de frações de células de áreas alagadas previstas com sucesso a partir das células de áreas alagadas observadas, os padrões espaciais das áreas alagadas foram bem simulados. Os autores apontam que um motivo para a falha dos índices ao preverem as áreas alagadas em Nasten e também, provavelmente, em outras classes de umedecimento, é que a resolução espacial no cálculo do índice foi grosseira comparada às escalas de comprimento típico das características topográficas nesta bacia, sendo apenas poucas dezenas de metros.

SACANLON *et al.* (2000) utilizaram uma versão modificada do TOPMODEL para simular a dinâmica da bacia South Fork Brokenback Run (237ha), localizada no Parque Nacional de Shenandoah, Virginia, EUA. Foram instalados piezômetros ao longo de um transecto na encosta que indicaram que o desenvolvimento de condições saturadas na parte superior é controlado pela precipitação total e condições antecedentes, ausência de precipitação, embora a heterogeneidade do solo influencie fortemente a resposta hidrológica. Na versão modificada do TOPMODEL utilizada, a teoria de índice topográfico generalizado é aplicada à zona de fluxo de chuva de subsuperfície para “gerar” as recessões de fluxo de chuva logarítmica, que indicam a transmissividade com decaimento linear com a profundidade. A drenagem vertical em relação à zona de água do solo é exigida e, ambos os reservatórios da subsuperfície são considerados para contribuir com a saturação da superfície.

SCHULER *et al.* (2000) com o objetivo de verificar como o TOPMODEL representa em sua forma original, os processos de geração de vazão em uma bacia sob condições subtropicais, suas deficiências e parâmetros efetivos, realizaram uma avaliação do modelo baseada na determinação das medidas de eficiência geradas a partir de um grande número de simulações, nas quais os valores dos parâmetros eram números randômicos estimados pelo método de Monte Carlo, dentro de uma faixa de valores pré-estimados. Foram utilizados dados de uma bacia de 59km<sup>2</sup>, localizada no município de Analândia, São Paulo, Brasil. A vazão média do posto é de 1m<sup>3</sup>/s no exutório e, 25m<sup>3</sup>/s próximo à confluência com o rio Piracicaba. O volume escoado na bacia é cerca de 33% do total precipitado. Foi elaborado um modelo digital de elevação da bacia, obtido através de digitalização do mapa topográfico da

bacia na escala 1:50.000 e manipulado por meio de interpolações, transformação em células de 20m x 20m e correção de irregularidades. As entradas do modelo são: precipitação, vazão e evapotranspiração. Esta foi calculada pelo método de Linacre, realizado em base mensal sendo que o total de evapotranspiração diário foi distribuído em valores horários no período entre 6h e 18h, segundo uma função senoidal. As propriedades físicas do solo – condutividade hidráulica saturada, granulometria, saturação máxima, capacidade de campo e ponto de murcha permanente – foram analisadas em 4 transectos em área de pastagem e 1 em área de floresta. O índice topográfico (que fornece a similaridade hidrológica dos pontos da bacia) foi gerado a partir do modelo digital de elevação com grid de 20m x 20m. Foram 200.000 execuções para vários períodos de mais ou menos 15 dias, durante 2 anos hidrológicos (de agosto de 1992 a julho de 1994) e 10.000 execuções para eventos de aproximadamente 20 a 80 horas. Os autores concluíram que o modelo é capaz de simular razoavelmente a vazão, com exceção das vazões máximas, utilizando diferentes combinações dos parâmetros e apontaram algumas limitações na modelagem, entretanto acrescentam que a introdução de modificações pode diminuir a simplicidade de cálculo do modelo, o que é um dos seus principais atributos.

VARELLA e CAMPANA (2000) analisaram a influência da resolução do modelo numérico do terreno no desempenho do modelo TOPMODEL. A bacia estudada foi a do rio Descoberto, Distrito Federal, Goiás, Brasil, cuja área de drenagem é de aproximadamente 114km<sup>2</sup>. Na seção de saída da bacia há uma estação fluviométrica (Descoberto Montante – DNAAE código 60435000) composta por 1 linígrafo e régua linimétrica, de onde se obtém os dados de vazão. Na área da bacia está localizada a estação pluviográfica de Brazlândia (DNAAE 01548007), da qual foram utilizados os dados horários de precipitação para o ano de 1995. Também foram utilizados os dados horários de precipitação da estação de Descoberto, localizada fora da área de drenagem da bacia, para o ano de 1998. Como não havia dados de evapotranspiração para o período de estudo, foram utilizadas informações sobre evaporação obtidas junto à Universidade de Brasília. Os dados de vazão perfizeram um total de 920 horas ininterruptas de medias, do dia 11/02/1998 (8h) ao dia 21/09/1998. Para valores de evapotranspiração foram utilizadas medidas de evaporação em tanque classe A obtidas na estação da Universidade de Brasília, assumindo que a taxa de evaporação diária na área de estudo é a mesma que na estação. As condições topográficas da bacia são fornecidas ao modelo sob a forma de índice topográfico cuja distribuição foi feita pelo programa GRIDATB,

que utiliza a técnica de análise do modelo numérico do terreno. O TOPMODEL processa, a cada intervalo de tempo, um único valor de precipitação para toda a bacia, porém os dados disponíveis mostraram uma distribuição não-uniforme da precipitação sobre a bacia. Assim, foi usado o método de Kriging para distribuir os valores mensais médios de precipitação na bacia. Para determinação do índice topográfico foram elaborados 7 modelos numéricos do terreno (resoluções: 30, 60, 90, 120, 150, 180 e 210m). A calibração do modelo foi executada por meio da estimativa de todos os parâmetros do modelo, utilizando dados referentes a eventos ocorridos no ano de 1988, que considerou a resolução numérica do terreno obtendo então, um conjunto de parâmetros para cada uma das resoluções espaciais. Os resultados apontaram uma maior sensibilidade do modelo para os parâmetros: 1) transmissividade lateral quando o solo está saturado e 2) decréscimo exponencial de transmissividade.

BEVEN e FREER (2001) apresentam a descrição de uma nova versão do modelo TOPMODEL, na qual a suposição de uma configuração de zona saturada quase estável é substituída por uma *rota de ondas* cinéticas do fluxo superficial implementada de uma forma que permita a simulação de áreas de contribuição variáveis dinamicamente. A nova versão retém a idéia de uma distribuição de pontos similares hidrológicamente na bacia, porém permite uma maior flexibilidade na definição da similaridade hidrológica. Isso faz com que a nova versão mantenha uma grande parte da eficiência computacional do modelo original, ao mesmo tempo em que oferece resultados a serem mapeados novamente no espaço da bacia. Os autores fornecem uma comparação entre a versão original e a dinâmica em uma aplicação na bacia de Slapton Wood (0,94km<sup>2</sup>), Devon, Reino Unido, dentro da metodologia GLUE. A nova versão fornece resultados que se ajustam melhor às descargas observadas, com limites de prognósticos aperfeiçoados, e padrões de armazenagem de déficit previsto que são qualitativamente mais consistentes com a compreensão das respostas desta bacia. A formulação original do TOPMODEL produz previsões que poderiam ser normalmente consideradas aceitáveis em termos de reprodução de características de descarga durante o período de simulação com valores de probabilidade (eficiência de Nash-Sutcliffe) maiores do que 0,9. O TOPMODEL dinâmico é um pouco melhor na previsão da descarga (até 0,946), porém há uma completa sobreposição entre o desempenho dos diferentes modelos dentro das faixas de modelo “comportamental”. Há algum aperfeiçoamento no “timing” dos picos de descarga e nos limites de previsão, porém prova insuficiente para rejeitar o modelo original

com base no desempenho da previsão de descargas isoladamente, certamente se o conceito de equifinalidade de modelo for aceito.

PETERS *et al.* (2001) comparam os resultados preliminares para uma nova versão do modelo dinâmico de escoamento de chuva TOPMODEL àqueles da formulação original do TOPMODEL para a previsão do escoamento na Bacia de Pesquisa do Monte Panola, Geórgia, coberta por floresta e com área de 41ha. A bacia foi dividida em 80 unidades hidrologicamente representativas com base no índice topográfico. Estimativas de evaporação foram calculadas a partir de dados da estação climática automática utilizando-se uma equação de Penman-Monteith. O TOPMODEL dinâmico utiliza uma rota de ondas cinéticas do fluxo da superfície, que permite a simulação de áreas de contribuição de afluência variáveis dinamicamente. O desempenho de cada modelo foi avaliado utilizando uma etapa de tempo de 30 minutos para cada um dos três anos de chuva (de outubro até setembro dos anos de 1993, 1994 e 1998) e os resultados foram compilados em relação aos períodos: chuvoso, úmido, seco e árido em cada ano. Uma medida de probabilidade do escoamento previsto foi similar em relação ao TOPMODEL original e o TOPMODEL dinâmico, e dependendo do ano e do sub-período, os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) dos melhores modelos classificaram-se de 0,5 a 0,7. Cada modelo foi inferior ao previsto no pico de escoamento, e durante a recessão, geralmente, ultrapassaram as previsões no escoamento nos períodos úmidos, sendo inferiores nos períodos de seca. Durante a recessão, todavia, a diferença entre o escoamento observado e o escoamento previsto no TOPMODEL dinâmico foi geralmente menor do que em relação ao TOPMODEL original. A distribuição de transmissividade das simulações do TOPMODEL dinâmico geralmente é mais estável, exceto durante os períodos de seca, do que as simulações do TOPMODEL original, ou seja, existe uma relação claramente definida entre a soma dos erros absolutos e a transmissividade média efetiva lateral saturada com uma estreita faixa de transmissividade para simulações SAE (soma de erro absoluto) mínimas. Os limites de previsão do TOPMODEL dinâmico são mais amplos e o limite inferior mais próximo permite o escoamento de recessão do que aquele do TOPMODEL original.

SANTOS (2001) empregou dois modelos distribuídos de base física, sendo um hidrológico (TOPMODEL) e outro geomorfológico (UMBRAL) com o objetivo de propor e discutir alternativas para subsidiar o zoneamento e o planejamento ambiental com base na modelagem de alguns processos geobiohidrológicos na bacia hidrográfica do Rio Pequeno,



São José dos Pinhais, PR. O clima local é classificado como temperado e a precipitação média anual é de 1400mm. A bacia possui área de drenagem total de 134km<sup>2</sup>, porém foi considerada para o trabalho a área afluente à estação fluviométrica de 104 km<sup>2</sup>. A bacia conta com uma estação fluviométrica onde são realizadas 2 medidas diárias do nível de água do rio bem como de precipitação e também, sensores de nível, de precipitação e de parâmetros de qualidade de água fornecem dados a cada 15 minutos. Para aplicação do modelo TOPMODEL foram utilizados dados de vazão horária do período de 1999 a 2000; dados horários de precipitação da estação pluviométrica (foi considerada que a precipitação da estação é igual à média sobre a bacia); a evapotranspiração potencial foi estimada pelo método de Penman modificado, sendo que os dados diários foram convertidos em dados horários com o uso de um coeficiente de ponderação; o modelo numérico do terreno utilizado tinha resolução de 40m. Como a versão do TOPMODEL utilizada possui um limite de 2500 intervalos de tempo em cada simulação, a série de dados foi dividida em 6 períodos e, para cada um deles foram determinados os parâmetros necessários para uso do modelo dos quais foi calculado um valor médio. Os resultados mostraram um bom ajuste do modelo à bacia, com coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,75 entre vazões calculadas e observadas. O autor conclui que o modelo TOPMODEL respondeu de forma eficiente às condições ambientais da área de estudo, o que confirma a sua aplicabilidade em regiões de clima úmido e relevo suave. Também foi observado que o modelo apresenta sensibilidade à inconsistência dos dados de precipitação, o que ressalta a necessidade do uso de dados de boa qualidade e com discretização temporal adequada.

CAMPLING *et al.* (2002) aplicaram o TOPMODEL em uma bacia tropical úmida, bacia da cabeceira do rio Ebonyi (379km<sup>2</sup>), Nigéria. Esta bacia está localizada na zona de transição entre a floresta tropical úmida de Guinéa-Congoliana e as zonas ecoclimatológicas de savanas da Guinéa. As faixas de elevação estão entre 105m e 565m acima do nível do mar, a temperatura média anual é de 23°C e a média anual de chuvas é de 1577mm. Os objetivos do estudo foram relatar as respostas hidrológicas quanto aos mecanismos de geração de escoamento ocorridos na bacia e estimar a incerteza associada à estimativa da hidrografia de escoamento. Foram analisados dados da estação úmida dos anos de 1994 e 1995 (março a outubro). Observações de campo indicaram que os níveis de água não eram paralelos à topografia da superfície. Um índice de referência topográfica  $\lambda_{ref}$  foi introduzido na estrutura do TOPMODEL para aumentar o peso dos déficits de armazenagem local em áreas mais altas.

A adaptação do modelo teve como efeito que os níveis de água aprofundavam-se com a distância do canal do rio. A estrutura de estimativa da incerteza da probabilidade generalizada (GLUE) foi utilizada para avaliar o desempenho do modelo com conjuntos de parâmetros aleatoriamente selecionados e para determinar limites de confiança de simulação. Os autores observaram que o decaimento exponencial parâmetro  $m$ , controlando o fluxo de base e o déficit de armazenagem local, foi o parâmetro mais sensível.

HUANG e JIANG (2002) apresentam uma abordagem de conexão completa entre a integração dos modelos ambientais e Sistemas de Informações Geográficas (GIS), apoiando de forma significativa o processo de simulação dinâmica do modelo hidrológico. A abordagem de conexão completa é ilustrada pelo AVTOP – uma realização do TOPMODEL com a linguagem macro Avenue of ArcView- dentro da qual todos os estágios da construção do modelo são realizados. Os autores afirmam que essa abordagem oferece um ambiente conveniente e único, que facilita de forma significativa aos usuários a análise de dados exploratórios e a tomada de decisões em relação às aplicações do modelo. Foi utilizado um conjunto de dados de amostra da bacia Slapton Wood, Devon, Reino Unido, para implementar o modelo. A bacia abrange  $0,94\text{km}^2$ , 60% dos quais ficam acima de 90m do limite, onde as encostas são suaves (geralmente menos de 5%) e o terreno é intensivamente cultivado como pasto e para a cultura de cereais e raízes. Abaixo dos 90m, as encostas são abruptas (até 25%) e há um pasto permanente e um bosque, que cobre 13,5% da bacia. O conjunto de dados de amostra inclui subdivisões do  $\ln(a/tg\beta)$ , chuva, evapotranspiração potencial e dados de descarga observados. O mapa de índice topográfico foi obtido a partir do modelo de elevação digital com 71 linhas e 51 colunas, com tamanho de célula de 20m. Os autores afirmam que o AVITOP pode dar algum *insight* nos padrões espaciais de respostas hidrológicas de uma maneira visual, em termos de apresentação de mapas e hidrografias das estimativas de área saturada na bacia de estudo com base na distribuição do índice topográfico.

O modelo TOPMODEL foi aplicado por RANZINI (2002) na Bacia D, localizada no Parque Estadual da Serra do Mar, próximo a cidade de Cunha, SP, com o objetivo de avaliar a adequação deste modelo para representar o comportamento hidrológico de microbacias da região. O clima local é, de acordo com a classificação de Köppen, temperado úmido, com temperatura do mês mais quente inferior a  $22^{\circ}\text{C}$ . A bacia (56,04ha) apresenta cobertura natural secundária, Mata Atlântica, elevação variando de 1228m a 1050m, seu perímetro é de 3450m

e a declividade do canal é de 7,1%. Na área há predominância de uma mesma classe de solos: Latossolo Vermelho Amarelo. A precipitação efetiva considerada foi a média dos 4 pluviógrafos instalados na área; um linígrafo do tipo flutuador forneceu as cotas do nível d'água para cálculo da vazão com a curva-chave; a evapotranspiração potencial foi calculada com o uso de um modelo senoidal. Foram determinados em campo: escoamento superficial, escoamento subsuperficial, taxa de infiltração, condutividade hidráulica saturada, recarga do lençol freático, curva de retenção de umidade, déficit de armazenamento de água de referência. Para uso do modelo foi gerado um modelo numérico de terreno de resolução de 20m e escolhido dois anos hídricos típicos: setembro de 1987 a agosto de 1988 e setembro de 1988 a agosto de 1989. A calibração do modelo foi obtida pelo método de Monte Carlo, sendo executadas simulações para o período de 01/12/1999 a 13/03/2000, para os meses de dezembro/99, janeiro/2000 e fevereiro/2000 e, para eventos isolados. Os resultados indicaram uma eficiência maior para as simulações de eventos isolados do que para simulações de eventos longos.

COELHO (2003) desenvolveu um novo modelo chuva-deflúvio (TOPMODIF) para previsão de respostas hidrológicas para pequenas bacias rurais, a partir dos modelos HUIG (Hidrograma Unitário Instantâneo Geomorfológico) e TOPMODEL. Foram estudadas suas bacias: bacia do Ribeirão palmital (38km<sup>2</sup>) e bacia do Ribeirão Pirapitingüi (67 km<sup>2</sup>), localizadas no estado de São Paulo. Para cada uma das bacias foi gerado um modelo de elevação digital, com tamanho de grid de 50m, a partir de duas cartas topográficas, na escala 1:50.000. Foram utilizados dados horários de vazão e precipitação fornecidos pelo CTH/DAEE; a evapotranspiração foi calculada pelo modelo senoidal utilizado por SCHULER (1998). Para cada bacia foram selecionados 3 eventos para calibração do modelos original e modificado (TOPMODIF), e 2 para validação. Com relação a utilização do modelo TOPMODEL original, o autor observou que o parâmetro  $m$  apresentou grande sensibilidade aos eventos testados, alta sensibilidade aos parâmetros  $T_0$  e  $SR_{max}$ , e baixa sensibilidade ao parâmetro  $SR_0$ . O autor concluiu que ambos os modelos simulam razoavelmente a vazão de períodos e eventos, utilizando diferentes combinações de valores dos parâmetros, muitas vezes sem significado real e, comparativamente, o TOPMODEL apresentou melhores resultados para as duas bacias, porém com valores bem próximos aos fornecidos pelo TOPMODIF.

MONTESINOS-BARRIOS e BEVEN (2003) apresentam uma revisão do modelo TOPMODEL abordando critérios de avaliação relacionados aos objetivos do modelo, processos modelados, procedimentos e cálculos, aplicabilidade e limitações, distribuição, suporte e documentação. Os autores afirmam que, embora o TOPMODEL tenha sido projetado inicialmente para simular as respostas hidrológicas de bacias em áreas úmidas com base no conceito de área variável de afluência, o modelo tem sido freqüentemente modificado para ampliar sua faixa de aplicação. Segundo os autores, algumas hipóteses como o comportamento exponencial da zona saturada, a superfície de nível d'água paralela ao solo e a área de contribuição constante de afluência, precisam ser abrandadas, uma vez que não podem ser seguramente aceitas. A calibração de parâmetros pode em princípio ser realizada com base nas medidas de campo, pois são fisicamente interpretáveis. Todavia, não são sempre possíveis de se obter, mesmo nas melhores condições experimentais porque os parâmetros exigidos pelo modelo são valores eficazes na escala da bacia. A falta de medição adequada em campo com relação a estimativa de parâmetros torna necessário o uso de técnicas de calibração. O modelo é muito sensível a mudanças do parâmetro de decaimento da condutividade hidráulica do solo, da transmissividade do solo na saturação, da capacidade de armazenamento da zona radicular e da velocidade de rota do canal, em bacias maiores. Os valores calibrados dos parâmetros também estão relacionados ao tamanho do grid utilizado na análise digital do terreno. A simulação do modelo é influenciada pelo espaço de tempo e pelo tamanho do grid. A interpretação física dos parâmetros calibrados pode ser difícil e também se espera que diferentes conjuntos de parâmetros venham a apresentar tanto uma simulação de descarga aceitável como uma interpretação física. Os autores apresentam como principais vantagens do modelo: parcimônia paramétrica e capacidade de visualizar os resultados de simulação em um contexto espacial.

RENNÓ e SOARES (2003) utilizaram o índice topográfico para estimar a profundidade do lençol freático espacialmente distribuído na bacia, considerando que lençol freático refere-se, neste caso, à linha que separa a zona de aeração da zona saturada. A bacia estudada é uma sub-bacia (59km<sup>2</sup>) localizada no curso superior do rio Corumbataí. Valores dos parâmetros  $K_0$ ,  $f$  e  $T_0$  foram extraídos do trabalho de SCHULER (1998). Foram utilizados dados de precipitação referentes à estação pluviométrica D4-108 para o período do final da estação seca do ano de 1995. Os dados de vazão eram provenientes da estação fluviométrica

4D-023 localizada no município de Analândia, SP. Os resultados indicaram haver boa relação entre o índice topográfico e as condições de saturação do solo. Os autores concluíram que a utilização do índice topográfico na estimativa da profundidade do lençol freático não foi satisfatória quando foram utilizados valores estimados de  $T_0$  provenientes de medidas de campo. Mas, conhecendo-se áreas “naturalmente” saturadas, têm-se boas estimativas da profundidade do lençol freático.

XAVIER *et al.* (2003) estudaram a análise de incerteza nas simulações de bacias hidrográficas, avaliando o impacto da não-consideração da distribuição real do campo de precipitação como dado de entrada de um modelo hidrológico. Foi adotado o modelo TOPMODEL modificado, de modo a considerar a precipitação espacialmente distribuída, considerando que, em cada classe do índice topográfico, a precipitação pudesse ser representada por um valor médio. A análise de incerteza das simulações do modelo foi realizada utilizando-se a metodologia Glue; a geração de campos de precipitação foi feita através do método da kigagem bayesiana. Foram analisados dados de uma sub-bacia do rio Iguaçu, a qual abrange os municípios de Belford Roxo, Duque de Caxias e Nova Iguaçu, no estado do Rio de Janeiro. O modelo numérico do terreno foi obtido com resolução de 25m. Os autores afirmam que a hipótese fundamental do TOPMODEL de que a recarga do reservatório subterrâneo é constante para toda bacia deve ser relaxada, para que o efeito da variabilidade da precipitação possa ser avaliado corretamente. Os resultados obtidos reafirmam que a representação imperfeita da precipitação em um modelo hidrológico é uma fonte de incerteza considerável.

BUYTAERT *et al.* (2004) analisaram o regime hidrológico usando o modelo TOPMODEL, com o objetivo de entender melhor como a mudança no uso do solo afeta a hidrologia de bacias do deserto que eram usadas para pastagem e agora apresentam atividades agrícolas. O modelo foi aplicado em uma microbacia de deserto de 2,65km<sup>2</sup>, pertencente a bacia do rio Machángara, sul do Equador. O deserto é caracterizado por apresentar clima frio e úmido; seus solos vulcânicos (Andsols) possuem uma capacidade de retenção de água muito alta. A bacia foi monitorada durante um ano com 3 pluviógrafos eletrônicos. As vazões foram medidas em intervalos de 30 minutos utilizando um vertedor de seção triangular e um sensor para medir o nível da água. Um modelo digital de elevação com células de 20m x 20m foi gerado a partir de curvas de nível. Os valores de evapotranspiração foram determinados com

base em dados meteorológicos medidos no deserto. O modelo foi calibrado usando 15 meses de dados. Os autores concluíram que o modelo é capaz de simular relativamente bem a hidrologia da bacia e que seus parâmetros representam bem a capacidade de amortecimento do solo. Observaram que as maiores fontes de incerteza do modelo são atribuídas à variabilidade espacial e temporal da precipitação, à dificuldade de estimar a evapotranspiração e o desconhecimento da contribuição na precipitação total.

### ***3.3. Intercepção Vegetal***

A intercepção é o processo pelo qual parte da precipitação é temporariamente retida pelas copas das árvores, sendo subseqüentemente redistribuída em água que respinga no solo, água que escoar pelo tronco e água que volta à atmosfera por evaporação. É denominada perda por intercepção a quantidade de água interceptada que evapora diretamente das copas, não atingindo o solo (HELVEY e PATRIC, 1965). A intercepção das precipitações pela cobertura vegetal constitui um dos fatores de maior importância no estabelecimento de balanço hídrico, notadamente como componente da evapotranspiração (STEWART, 1977; CALDER, 1977).

A maioria dos estudos foi conduzida em cobertura florestal, sendo escassos os trabalhos sobre intercepção realizados com culturas, anuais ou perenes. Também são poucas as pesquisas que modelam o processo de intercepção sendo que alguns modelos não podem ser utilizados em condições distintas da realização do experimento, por não apresentarem relação com o grau de desenvolvimento da cultura.

Os trabalhos citados a seguir estão relacionados à pesquisa sobre intercepção foliar desenvolvidas com cultivos agrícolas.

BUTLER e KING (1982) mediram a precipitação que atravessa a folhagem entre as linhas de uma plantação de cereal utilizando uma balança eletrônica com resolução de 0,1mm de água. O desempenho em campo foi avaliado em três dias (2, 5 e 17 de julho de 1981) e os resultados foram usados para obter a quantidade de chuva interceptada por um dossel de trigo com cobertura de chão completa. Foram utilizadas 6 balanças, ao longo da estação crescente de 1981. O volume de água coletado (V) foi relacionado linearmente à quantidade medida de chuva, medida com pluviógrafo de 0,6mm de resolução. A precipitação média que atravessa a folhagem foi calculada pela média aritmética das observações das 6 balanças. A diferença entre chuva e precipitação que atravessa a folhagem foi considerada a água interceptada pela cobertura. Os resultados obtidos foram expressos sob a forma de gráficos os quais mostram que, nos dias 2 e 17 de julho, a água interceptada aumentou linearmente com a chuva e não havia indicação de que a capacidade de saturação do dossel tivesse sido alcançada. No dia 5 a água interceptada aumentou rapidamente durante o primeiro milímetro de chuva, e então deixou de aumentar fornecendo uma assíntota que pode ser considerada como a capacidade de saturação do dossel para este dia. O índice de área foliar do dossel estava entre 2 e 3, e a

capacidade de saturação freqüentemente excedia 1mm. Os autores concluíram que o uso de balanças nas entre linhas para medir a precipitação que atravessa a folhagem só é praticável depois que o dossel alcance a cobertura completa do chão.

VIEIRA (1982) pesquisou a repartição das águas das chuvas na cultura de cana-de-açúcar durante o período de 25 de setembro de 1981 a 30 de março de 1982. O trabalho foi desenvolvido em uma área da Companhia Industrial Agrícola Ometto, Usina Iracema, município de Iracemópolis, SP, cultivada com a variedade CB41-76, terceira soca. Para medida da precipitação interna foram instalados, ao acaso, 30 pluviômetros em duas áreas de 5m x 5m (15 por área). Para medir a precipitação incidente (a céu aberto) foram instalados em um carreador, 10 pluviômetros distanciados 10m entre si. Coletores foram instalados ao redor de todos os colmos de 7 touceiras, 4 em uma área e 3 na outra. Dados meteorológicos foram obtidos junto ao posto da usina Iracema, distante cerca de 2km do local. A precipitação interna foi considerada a média do posto enquanto as plantas apresentavam altura inferior a 50cm. Medidas feitas no próprio local tiveram início em 30 de novembro. No período de análise, a precipitação incidente total foi de 1139,5mm, a precipitação interna e escoamento pelo colmo representaram 64% (734,1mm) e 12% (131,1mm), respectivamente. A precipitação efetiva atingiu 76% da precipitação incidente o que equivaleu a 865,2mm e as perdas por interceptação, 24% (274,03mm). O autor obteve equações de regressão para precipitação interna e escoamento pelo colmo, porém os dados analisados ajustaram-se melhor a um polinômio de segundo grau mostrado nas equações seguintes:  $P_L (\%) = 65,073 - 1,033 x + 0,006 x^2$  ( $r = 0,78$ ),  $EC(\%) = 3,398 + 0,920 x + 0,005 x^2$  ( $r = 0,91$ ), onde x representa o número de dias acumulados.

BUTLER e HUBAND (1985) compararam o total de água que alcança o solo, obtido marcando a superfície de solo com látex, com a precipitação que atravessa a folhagem medida no terço central da entre linha de um dossel de trigo maduro. Foram executadas medidas da precipitação que atravessa a folhagem, em trigo de primavera (*Triticum aestivum* cv. Tommi) em 1981, e com trigo de inverno (*Triticum aestivum* cv. Bounty) em 1982. A precipitação que atravessa a folhagem e o escoamento pelo tronco foram medidos também na fileira, inserindo caixas sem fundo ao redor das plantas. Quando a caixa estava completa, látex natural foi vertido sobre o solo, tomando cuidado para marcar a superfície ao redor de cada talo e os lados da caixa. Foi medida durante cada período de chuva, a quantidade de água que correu fora do



látex e foi para o recipiente coletor. Foram instaladas 7 caixas de látex na cultura em 1981 e, 5 em 1982. Para avaliar a quantidade de água coletada com o látex, uma caixa semelhante que não continha nenhuma planta (caixa de látex referência) foi usada em 1981, ao ar livre. Nos anos de estudo as medidas foram iniciadas próximo ao fim da extensão dos talos e continuaram até a colheita. O índice de área foliar (IAF) era aproximadamente 3 em ambos os anos. A chuva a céu aberto foi coletada por um pluviógrafo. Em 1984 foram executadas medidas com trigo de inverno (cv. Avalon) dentro de uma área de 3m x 3m de cultura, selecionada por sua uniformidade. Como não ocorreu nenhuma chuva ao longo da estação crescente, foi aplicada água artificialmente por um aspersor. Foram realizadas medidas de precipitação que atravessa a folhagem mais escoamento pelo tronco aplicando látex na área de chão ao redor e entre duas fileiras adjacentes. Uma calha de 2m de comprimento foi primeiramente introduzida no solo, dentro da entre linha. A interceptação foi obtida pela diferença entre a chuva e a precipitação que atravessa a folhagem. Foram obtidos valores de interceptação para os dois arranjos experimentais em três dias. Nos dias 9 e 10 de junho foi aplicada água por irrigação, e embora a taxa de aplicação fosse semelhante em ambos os dias, a eficiência de interceptação foi diferente. Aplicando 5mm de água, as quantias interceptadas foram aproximadamente 1mm em 9 de junho e 2mm no dia 10 de junho. No dia 16 de junho a interceptação alcançou 3mm quando a mesma quantia de água foi aplicada a uma taxa semelhante. As medidas do estudo indicaram que as perdas por interceptação foram da ordem de 40% da precipitação incidente. Tanto para chuva quanto para irrigação as quantias de escoamento pelo tronco não foram significativas.

A interceptação das chuvas em macieiras foi estudada por MIRANDA e BUTLER (1986), na estação de pesquisa de Long Ashton, em Bristol, Inglaterra, cultivada com árvores de maçã Cox's Pippin. Durante um período de 3 meses correspondente ao verão de 1980 foram executadas medidas de chuva incidente, precipitação que atravessa a folhagem e escoamento pelo tronco. A variabilidade da precipitação que atravessa a folhagem sob uma árvore e em parcela foi avaliada. Equações foram estabelecidas para estimar a perda por interceptação, precipitação que atravessa a folhagem e escoamento pelo tronco a partir da chuva incidente. Foram executadas medidas de precipitação que atravessa a folhagem e escoamento pelo tronco em duas linhas centrais dentro do pomar. A chuva incidente total depois da ocorrência de um evento de chuva foi medida em uma área aberta (10,5m x 25m) de

grama ceifada, distante aproximadamente 100m do local, utilizando dois medidores de precipitação (um pluviômetro e um pluviógrafo). Para testar a variabilidade da precipitação que atravessa a folhagem sob uma árvore, foram instalados 22 pluviômetros locados simetricamente ao redor do tronco em duas linhas sendo que uma das linhas era paralela à linha de plantio. Depois de 21 eventos de chuva, a precipitação que atravessa a folhagem foi testada estatisticamente. Para avaliar a variabilidade entre as árvores foram utilizados 4 medidores colocados a 60cm do tronco, debaixo de cada árvore, em linhas paralelas ou normais à linha de plantio. Uma árvore de referência foi selecionada para fornecer medidas em posição fixa e outros medidores eram remanejados ao acaso, debaixo de dois conjuntos de 04 árvores. Foram feitas medidas para cada conjunto de árvores por um período de quatro semanas. Para medir o escoamento pelo tronco foram usados medidores espirais de alumínio fixados em 19 troncos de árvores a uma altura de 50cm acima do solo. No período de análise, 42 eventos de chuva foram divididos em classes de chuva total. A precipitação total do período foi de 134mm dos quais 84% representaram a precipitação que atravessa a folhagem e 0,8%, o escoamento pelo tronco. A perda por interceptação foi calculada como sendo a diferença entre a precipitação incidente e a chuva líquida (precipitação que atravessa a folhagem mais escoamento pelo tronco), e atingiu 15,2%. A equação que relaciona a interceptação ( $I\%$ ) com a precipitação incidente ( $P_I\%$ ), obtida pelos autores, é uma hipérbole retangular:  $I = 4,03 + 95,97 / (1 + 1,36 P_I)$ ,  $r^2 = 76\%$ . Também foi obtida uma equação para relaciona a precipitação que atravessa a folhagem ( $P_L\%$ ) à precipitação incidente:  $P_L = 94,92 - 94,92 / (1 + 1,37 P_I)$ ,  $r^2 = 75\%$ . Não foi registrado nenhum escoamento pelo tronco para chuvas incidentes com menos de 1,5mm de lâmina. A capacidade de armazenamento do dossel foi determinada pelo método de Leyton (1967) onde a precipitação que atravessa a folhagem era plotado contra a precipitação incidente e determinada uma linha reta a partir dos pontos superiores. Não foram considerados eventos de chuva com menos de 1,0mm. O valor encontrado para capacidade de armazenamento de um dossel cultivado com maçãs Cox's Orange Pippin foi de 0,5mm, e o índice de área foliar deste tipo de dossel é aproximadamente 4. Foi obtida uma linha de regressão para expressar a variação do escoamento pelo tronco (EC) com a precipitação incidente ( $P_I$ ), para 16 eventos de chuva:  $EC = 0,01 P_I - 0,005$  ( $r^2 = 0,92$ ,  $P = 0,001$ ). Os valores de precipitação que atravessa a

folhagem variaram de 0 a 96% da chuva incidente e os de escoamento pelo tronco, de 0 a 2%. A capacidade de armazenamento pelo tronco atingiu o valor de 0,005mm.

RAO (1987) quantificou as perdas por interceptação em árvores de caju em uma área experimental situada no campus do Centro de Kottamparamba, Índia. A plantação tinha 15 a 20 anos de idade, espaçamento 6m x 6m, altura variando de 4 a 5m e Índice de Área Foliar de 1,0 a 1,25. O período de medidas abrangeu os anos de 1983 e 1984. Foram executadas medidas de precipitação incidente (registrada em campo aberto por meio de um registrador automático de chuva), radiação, temperatura e umidade do ar, velocidade do vento, precipitação que atravessa a folhagem (9 registradores) e escoamento pelo tronco (uso de colares metálicos e um registrador automático de chuva). Para medida da chuva líquida no solo (total de precipitação que atravessa a folhagem e escoamento pelo tronco) foi instalada uma chapa plástica de 36m<sup>2</sup> sendo que, a água da cobertura plástica era drenada ao longo de um declive natural até atingir um reservatório e atravessar um medidor de água calibrado. No período de análise a precipitação total foi de 6021mm e, um total de 105 eventos de chuvas selecionados dentro de uma série de chuvas com lâmina d'água menor que 25mm (valores superiores a este causaram respingos e transbordamento do registrador de chuvas). A interceptação foi obtida pela diferença entre a precipitação incidente ( $P_I$ ) e a chuva líquida no solo ( $P_L$ ). Foram efetuadas correções nas medidas de chuva líquida devido à evaporação e ao armazenamento de água em depressões na placa plástica. A capacidade de armazenamento do tronco (0,8mm) foi obtida pela interseção da linha do gráfico de chuva incidente *versus* chuva líquida ( $P_L = 0,750 P_I - 0,757$ ,  $r = 0,836$ , 5% de significância), para precipitações superiores a 1,5mm. A precipitação que atravessa a folhagem e o escoamento pelo tronco foram obtidos por análise de regressão simples entre a chuva líquida e a precipitação incidente ( $P_L = 0,391 P_I - 0,013$ ,  $r = 0,686$ , 1% de significância), para chuvas menores de 1,0mm. O escoamento pelo tronco foi observado apenas para chuvas com lâmina igual ou superior a 3,0mm e constituiu 0,7% do total de chuva que atingiu os cajueiros. Os valores de perda por interceptação foram comparados com estimativas de um modelo simplificado proposto por Gash (1979). Cerca de 31% das chuvas analisadas foi perdido por interceptação sendo que a porcentagem de interceptação foi máxima para eventos tempestades  $\leq 5,0$ mm. Observou-se que há uma redução gradual na porcentagem de perda por interceptação com o aumento do

volume de chuva. Os valores estimados pelo modelo de Gash (1979) mostraram-se ligeiramente abaixo dos valores medidos.

LUCHIARI (1989) estudou a repartição das chuvas em culturas de citros num pomar comercial cultivado com a variedade Valência (*Citrus sinensis* Osbeck) com 10 anos de idade, espaçamento de 6m entre as plantas e 8m entre as linhas, altura média de 4m, situado na Fazenda Amazonas I, município de Leme, SP, Brasil. A pesquisa foi implantada em novembro de 1986 e encerrada em julho de 1988, onde foram determinadas as relações percentuais entre precipitação incidente sobre a cultura e as parcelas que atingem o solo através da precipitação interna e do escoamento pelo tronco que, somadas geram a precipitação efetiva. A quantidade de água interceptada pela copa das plantas e evaporada para a atmosfera também foi determinada. Foram utilizadas quatro estações compostas de uma árvore cada, onde foram instalados para medir a precipitação interna, 40 micropluviômetros radialmente distribuídos, e um coletor constituído de uma calha anelada de alumínio, mangueira flexível e reservatório (100litros), para medida do escoamento pelo tronco. Com o objetivo de medir a chuva precipitada nas linhas da cultura, foram instalados 5 micropluviômetros. Sobre a copa das árvores foi instalado um pluviômetro. Para medida da precipitação incidente foi instalado um pluviômetro a céu aberto, a 4m acima do solo, ligado por uma mangueira flexível a um recipiente com 5 litros de capacidade e também, 5 micropluviômetros, a 70cm do solo, entre as linhas de plantio. No período de estudo (de 07/11/86 a 01/06/88) foram coletados 70 dados que totalizaram 3072,54mm da precipitação incidente. O autor obteve os seguintes valores para repartição das chuvas: 79% (2412,07mm) de precipitação interna ( $P_L$ ), 4% (126,16mm) de escoamento pelo tronco (EC), 83% (2538,23mm) de precipitação efetiva ( $P_E$ ). A interceptação (I) foi obtida pela expressão  $I = P_I - (P_L + EC) = P_I - P_L$  e atingiu 17% (534,31mm). As porcentagens referem-se à precipitação incidente. Através do uso do método da análise de regressão foram encontradas relações entre  $P_I$ ,  $P_L$ ,  $P_E$  e EC, mostradas nas equações:  $P_E = - 2,515 + 0,882 P_I$  ( $r = 0,987$ );  $P_L = - 2,818 + 0,847 P_I$  ( $r = 0,986$ );  $EC = + 0,303 + 0,034 P_I$  ( $r = 0,887$ ). O autor sugere que em estudos relacionados ao assunto se faça a medição da intensidade das chuvas, velocidade e direção dos ventos.

MIRANDA (1994) pesquisou a divisão de chuva em uma plantação de cacau (*Theobroma cacao* Lour.) com 15 anos de idade, plantada com espaçamento de 3m x 3m, densidade de 211 árvores por hectare, e altura média 4m, durante 2 anos e meio (iniciados em

setembro de 1983), na estação de pesquisa do centro de Pesquisa de Cacau , Bahia, Brasil. A cultura era sombreada por árvores *Erythrina fusca* Lour., plantadas com espaçamento de 24m x 24m (18 árvores por hectare), com altura variando entre 15 e 20m. A perda por interceptação foi calculada pela diferença entre precipitação incidente e precipitação líquida (precipitação que atravessa a folhagem mais escoamento pelo tronco). A chuva incidente foi medida no centro de duas áreas abertas (20m x 20m) adjacentes, de solo descoberto, localizadas cerca de 150m a leste e ao sul da parcela experimental. Foram usados 2 pluviógrafos sendo que cada medidor foi colocado de forma que fosse obtido um mínimo de 45° de visão irrestrita do céu em todas as direções. Foram instalados 10 funis a 0,8m acima do topo das copas das árvores. A chuva capturada acima das árvores foi recolhida para um recipiente plástico preso verticalmente acima da copa. A precipitação que atravessa a folhagem foi coletada por 20 medidores colocados simetricamente ao redor do tronco de cacau, em duas linhas, sendo uma paralela à linha de plantio. Uma árvore de referência foi selecionada tendo metade dos medidores em posições fixas, distantes do tronco 30, 90 e 150cm, e os outros medidores restantes em baixo de árvores selecionadas ao acaso toda semana. Depois de um ano de medidas, a variação da precipitação que atravessa a folhagem foi avaliada estatisticamente. O escoamento pelo tronco foi coletado por medidores metálicos espirais, fixados em 15 troncos a cerca de 50cm acima do solo. As áreas lisas das copas foram estimadas por projeção vertical, do limite da copa para o chão e, equivaleram a 9m<sup>2</sup>. Na segunda metade do experimento, a redistribuição quantitativa da chuva no dossel de cacau foi medida usando 20 calhas metálicas que foram locadas em pontos selecionados ao acaso e abaixo das folhas mortas no chão. Dez das calhas foram erguidas 0,7m do solo e conectadas a 2 galões de polietileno. Foram obtidos dados para 102 eventos de chuva variando de 0,1 a 65,0mm, os quais representaram 12% dos 4751mm registrados durante o período experimental. Vinte e nove eventos de chuva medidos acima do dossel de cacau excederam a precipitação sobre a área experimental. Estes dados não foram descartados, mas incorporados ao restante dos dados, e a precipitação que atravessa a folhagem foi considerado como 100%. A variabilidade da precipitação que atravessa a folhagem na área de estudo foi estimada comparando as quantias médias de precipitação que atravessa a folhagem de cada árvore com a referência sendo que, não foram encontradas diferenças significativas. A precipitação que atravessa a folhagem representou 85% da precipitação incidente. O escoamento pelo tronco variou de 0 a 8% sendo em média, 2% da

chuva incidente. Não foi detectado escoamento pelo tronco em eventos de chuva menores que 5,0mm. A perda total por interceptação foi de 44% da precipitação incidente apresentando a seguinte distribuição média: 16% de perda por interceptação pelas árvores de proteção, 19% de perda por interceptação pelas árvores de cacau e 9% de perda por interceptação pelas folhas mortas no solo.

Com a finalidade de simular a precipitação efetiva - parcela da precipitação total que poderá ser incorporada ao uso consultivo de água pelas plantas - para fins de irrigação suplementar, foi desenvolvido por SILVA *et al.* (1994) um modelo embasado nas propriedades físico - hídricas do solo, nas características de cada chuva, nas condições de evapotranspiração da cultura e nas perdas por interceptação foliar. Para calcular a precipitação efetiva, foi ajustada uma equação potencial a partir dos dados medidos de interceptação foliar de 21 chuvas, no período de 7 de dezembro de 1991 a 22 de janeiro de 1992, na cidade de Viçosa, estado de Minas Gerais, Brasil. Os parâmetros utilizados para compor o modelo foram: precipitação (total e duração), evaporação do tanque classe A, velocidade de infiltração básica na superfície do solo, condutividade hidráulica saturada em cinco camadas de solo, interceptação foliar, porosidade do solo em cinco camadas, umidade do solo em cinco camadas a um potencial matricial de 30kg Pa. A equação obtida foi  $itp = \mathfrak{S} P^\beta$ , onde  $itp$  representa a interceptação foliar em mm,  $\mathfrak{S}$  e  $\beta$  são parâmetros que dependem do dossel vegetativo e  $P$  é a precipitação incidente total em mm. O modelo foi testado usando a cultura do milho (*Zea mays* L.) sendo que as medições de interceptação foliar com chuva natural foram iniciadas no 39º dia após o plantio da cultura, encerrando-se no 89º após o plantio. O total das precipitações foi de 299,2mm e os parâmetros  $\mathfrak{S}$  e  $\beta$  da equação foram 0,956 e 0,609 respectivamente, o que resultou em 97,1mm de interceptação.

LEUNING *et al.* (1994) estudaram componentes da divisão sazonal de uso de água em um campo de trigo de 5 hectares, localizado no campus da Universidade Charles Sturt, Wagga Wagga, N.S.W. A variedade Montong foi semeada em 26 de maio de 1991, em fileiras de 170mm de distância, e a densidade de plantas depois da emergência era 160 plantas/m<sup>2</sup>. O pico de índice de área foliar (IAF) foi 3,9. A velocidade do vento foi medida usando um anemômetro, a uma altura de 0,6m acima da cultura. Intensidade de chuva foi mensurada utilizando um pluviógrafo, em intervalos de 6 minutos. Os resultados do instrumento automático foram conferidos com um pluviômetro padrão de 200mm, lido manualmente. O

déficit de saturação foi calculado a partir das temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido medidas com termômetros aspirados de resistência de platina, localizados a 0,8m acima da cultura. Também foi medido o fluxo de calor no solo. O IAF foi estimado usando uma combinação de biomassa colhida e técnicas de interceptação de luz. A biomassa sobre o solo foi medida a cada duas semanas a partir de colheitas de 12 parcelas de 0,5m<sup>2</sup>. A evapotranspiração total foi estimada usando uma combinação de medidas de refletância e medidas de sonda de neutros. Foram utilizados lisímetros de miniatura para medir evaporação do solo do dossel. Evaporação de chuva interceptada foi calculada usando uma técnica aerodinâmica em conjunto com um coeficiente de armazenamento do dossel. Medidas detalhadas de evaporação do solo e da interceptação de chuva tiveram início 80 dias depois da semeadura, quando o índice de área foliar (IAF) era aproximadamente 1, até 165 depois da semeadura. As perdas por interceptação atingiram 33% da chuva deste período (114mm) enquanto que a evaporação do solo foi 48% da chuva. A interceptação combinada com perdas por evaporação do solo para toda a estação crescente representou 49% (93mm) da evapotranspiração total.

CASTILHO (2000) monitorou a perda por interceptação durante o período de 05 de fevereiro a 20 de dezembro de 1999. O experimento foi implantado em uma área da Faculdade de Engenharia Agrícola – UNICAMP, município de Campinas, SP, cultivada com a variedade NA 72454. Foram instaladas 29 calhas coletoras abaixo da folhagem da cultura, entre as linhas de plantio, cada qual conectada a um reservatório de armazenamento. Medidas diárias do volume armazenado forneceram a quantidade da precipitação que atingia o solo. Medidas mensais do índice de área foliar (IAF) foram executadas para cada uma das calhas e para toda a parcela. O valor da parcela de chuva interceptada foi calculado a partir de um modelo linear no qual a precipitação que atinge o solo é função da precipitação incidente e do IAF:  $P_L = a P_I + b$ , onde  $P_I$  representa a precipitação incidente e  $P_L$ , a precipitação que atravessa a vegetação atingindo o solo; o coeficiente angular (a) está relacionado ao índice de área foliar da cultura e o coeficiente linear (b) representa as características médias da cultura estudada. A quantidade de chuva interceptada pela cultura ( $P_p$ ) foi obtida subtraindo da precipitação incidente ( $P_I$ ) o valor da lâmina de água no solo ( $P_L$ ). Estabeleceram-se classes de IAF nas quais foram agrupadas as calhas experimentais. Para cada classe foi determinado o valor médio de IAF, para o qual foi estabelecido um modelo linear. Posteriormente, foi determinado o modelo

linear representativo da parcela experimental considerada em sua totalidade. No período de estudo, a precipitação incidente total analisada foi de 778,9mm, dos quais 39,5% foram interceptados e 60,5% representaram a lâmina de água no solo (valores médios). O valor médio do IAF nas calhas foi de 1,95 e o valor médio da superfície de IAF na parcela foi de 2,86.



## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1. Município de Limeira

O município de Limeira está localizado a 154km a noroeste da cidade de São Paulo, na região central do Estado de São Paulo, pertence à Região Administrativa de Campinas. Geograficamente, encontra-se a 22°33'54" Latitude Sul e 47°24'09" Longitude Oeste. Sua área total é de 597km<sup>2</sup> sendo 100,15km<sup>2</sup> de perímetro urbano; 26,48km<sup>2</sup> de perímetro de extensão urbana; 9,80 km<sup>2</sup> de perímetros urbanos isolados e, 460,60km<sup>2</sup> de zona rural (PREFEITURA MUNICIPAL DE LIMEIRA, 2001).

Encontra-se a uma altitude média de 537m e está localizado na Depressão Periférica do estado de São Paulo, entre os rios Piracicaba e Mogi Guaçu. A temperatura média anual é de 22°C (NET LIMEIRA, 2001). Faz divisa com Cordeirópolis e Araras, ao Norte; Engenheiro Coelho, Arthur Nogueira e Cosmópolis, a Leste; Americana e Santa Bárbara D'Oeste, ao Sul e, Piracicaba e Iracemópolis, a Oeste. Pertence à Bacia Hidrográfica do Piracicaba, sendo três seus principais cursos d'água: o Ribeirão do Tatu, Ribeirão da Geada e Ribeirão do Pinhal (PREFEITURA MUNICIPAL DE LIMEIRA, 2001).

Seu território é cortado no sentido Norte-Sul pela Via Anhangüera, principal rota de ligação entre a Capital e as regiões Norte e Centro de São Paulo. Ocupa uma posição privilegiada em meio a um importante entroncamento rodo-ferroviário (Via Anhangüera; Rodovia dos Bandeirantes; Rodovia Washington Luís; Limeira-Piracicaba; Limeira-Mogi-Mirim; FERROBAN), dista 58km de Campinas, 29km de Piracicaba, 25km de Rio Claro, 20km de Americana e 50km de Mogi-Mirim. (PREFEITURA MUNICIPAL DE LIMEIRA, 2001). Na agricultura destacam-se as produções de cana-de-açúcar, laranja, limão, tangerina, abacate, milho, algodão e, em menor escala, arroz e feijão (NET LIMEIRA, 2001).

## **4.2. Bacia Hidrográfica do Estudo**

### **4.2.1. Localização**

A bacia alvo deste estudo apresenta superfície de drenagem de 4,6km<sup>2</sup>, é uma sub-bacia do Ribeirão Pinhal. O ribeirão Pinhal desagua a uma distância de 3,5km do rio Jaguari, que é tributário do rio Piracicaba. A bacia se encontra próxima à hidroelétrica do Tatu, localizada a 11km de Americana e a 16km de Limeira.

### **4.2.2. Acesso**

Na rodovia Anhangüera-SP, sentido capital interior, 3,5km depois da ponte sobre o rio Piracicaba toma-se um desvio à direita e, percorre-se 5km em uma estrada de terra. Saindo do município de Limeira, percorre-se 5,3km na estrada para Cosmópolis, entra-se à direita na estrada de terra e, percorre-se 4,8km até o local.

### **4.2.3. Escolha da Bacia para o Estudo**

A bacia estudada foi escolhida por apresentar as seguintes características: bacia rural com solo e ocupação típicos do município de Limeira e região; dimensões compatíveis com o modelo escolhido para execução das simulações e dados previamente coletados.

### **4.2.4. Geomorfologia**

A área de estudo está situada na região sudeste do estado de São Paulo, fazendo parte da Depressão Periférica (Dpq), na zona denominada Médio Tietê. A bacia apresenta relevo suavemente ondulado (MARTINS, 2001).

### **4.2.5. Clima**

De acordo com MARTINS (2001) a distribuição pluvial da região apresenta regime típico das zonas tropicais de baixa altitude, caracterizado por verão chuvoso e inverno seco; a estação seca (de abril a setembro) concentra 21% das precipitações, enquanto a chuvosa (de outubro a março) apresenta 79%. A temperatura média mínima durante o inverno é inferior a 18°C e, a média máxima é superior a 22°C no verão. O mês mais frio é junho, apresentando temperatura média de 17,1°C e, o mais quente, janeiro (23,1°C). O clima local é classificado segundo Köppen como sendo do tipo Cwa: Tropical de altitude.

#### **4.2.6. Vegetação**

Segundo MARTINS (2001), a vegetação local original era constituída de mata latifoliada e cerrado. Atualmente, o uso é agrícola com predominância das culturas de cana-de-açúcar e citros.

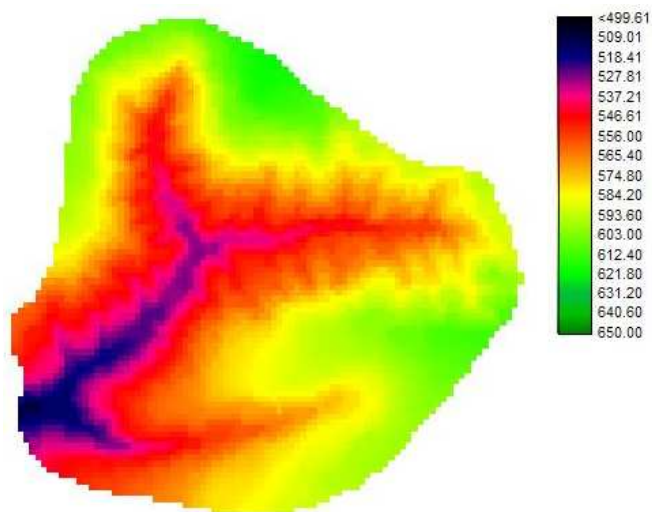
#### **4.2.7. Solos**

A área da bacia está inserida na unidade Valinhos da quadrícula de Campinas. Segundo BRANDÃO *et al.* (2001), a bacia do Ribeirão Pinhal apresenta predominância de dois grandes grupos de solos - Podzólico Vermelho e Amarelo e Latossolo Vermelho Amarelo; também são encontrados: Latossolo Vermelho Escuro, Latossolo Roxo, Solos Litólicos, Terra Roxa Estruturada e uma pequena quantidade de Solos Hidromórficos.

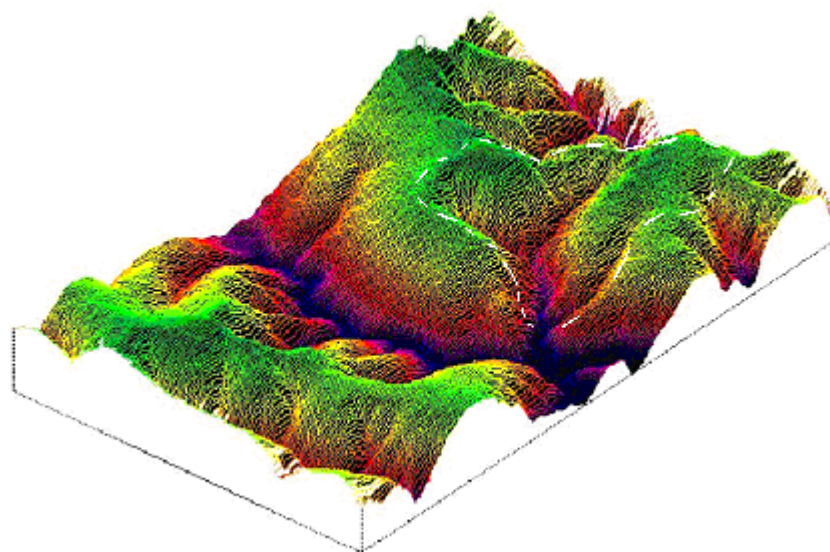
De acordo com MARTINS (2001) a bacia está inserida na classe III de uso do solo uma vez que, sua característica de declividade moderada não permite o uso contínuo com culturas anuais sem o devido manejo contra a erosão, sendo mais viável a exploração de culturas perenes e outras que proporcionem boa cobertura e proteção do solo (café, citros, cana-de-açúcar, por exemplo).

#### **4.2.8. Modelo Numérico do Terreno**

Um modelo numérico do terreno (Figuras 4 e 5) foi obtido a partir de uma carta planialtimétrica do Instituto Geográfico e Geológico de São Paulo (IGG – SP) na escala 1:10.000, a qual apresenta as principais características topográficas da área e informações como: vias de acesso, rede de drenagem, posicionamento geográfico e limites de municípios. As cartas, que a bacia está inserida, foram digitalizadas em “scanner” de rolo e por meio do processo de vetorização semi-automática, as curvas de nível foram exportadas do programa AUTOCAD (versão 14.0) para o SURFER. O modelo foi gerado com resolução de 10m x 10m, fazendo uso dos programas computacionais SURFER e IDRISI (HEIN, 2000). A partir do modelo numérico de terreno foram outras cartas: orientação dos terrenos, inclinação.



**Figura 4** – Modelo Numérico do Terreno, resolução 10m x 10m (Fonte: HEIN, 2000; HEIN). Dados originais obtidos de carta planialtimétrica do Instituto Geográfico e Geológico de São Paulo, escala 1:10.000.

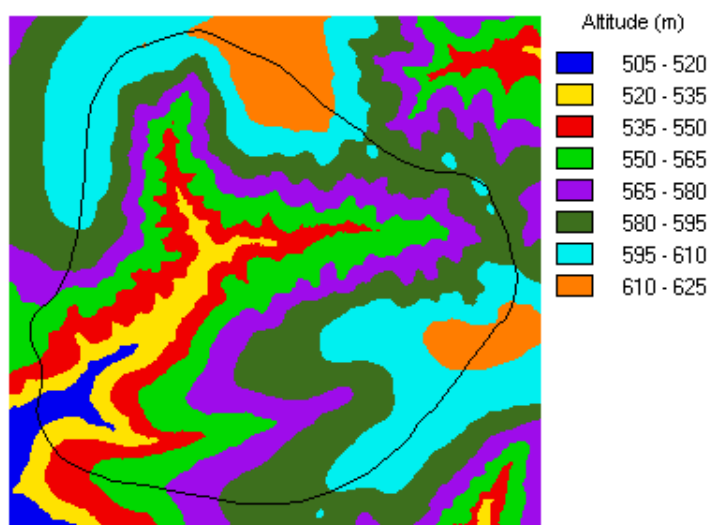


**Figura 5** – Modelo Numérico do Terreno em 3 dimensões da região do reservatório do Tatu e da bacia em estudo (divisor de águas – linha branca), resolução 10m x 10m (Fonte: HEIN, 2000; HEIN). Dados originais obtidos de carta planialtimétrica do Instituto Geográfico e Geológico de São Paulo, escala 1:10.000.

## 4.2.9. Caracterização Física

### 4.2.9.1. Altitudes

A Figura 6 mostra que as altitudes variando de 505m a 625m, e de acordo com HEIN (2000), 60,5% da área da bacia apresentam altitudes entre 565m e 610m e valores superiores a 610m são encontrados em 6,2% da área.



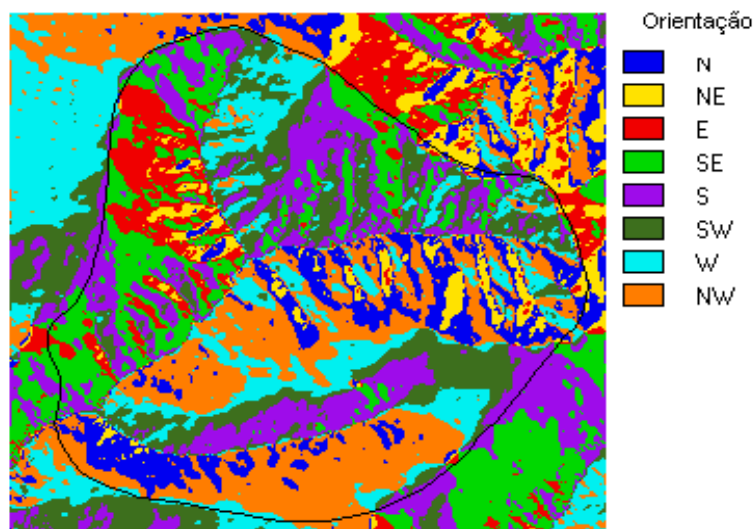
**Figura 6** - Carta de altitudes, resolução 10m x 10m da bacia em estudo (Fonte: HEIN, 2000; HEIN e TEIXEIRA FILHO, 2000). Dados originais obtidos de carta planialtimétrica do Instituto Geográfico e Geológico de São Paulo, escala 1:10.000.

### 4.2.9.2. Orientação dos terrenos

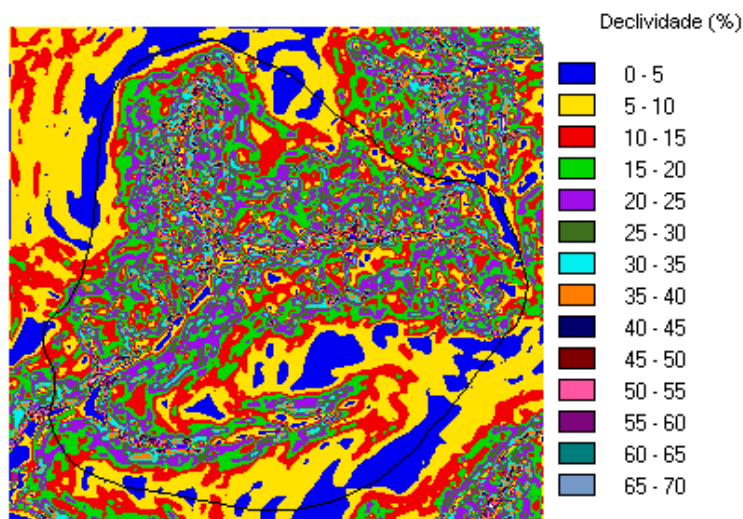
Na Figura 7 é apresentada a variabilidade de orientações dos terrenos, predominando, de acordo com HEIN (2000) a orientação Noroeste (18,3%) seguida das orientações Oeste (15,8%) e Sul (15,5%).

### 4.2.9.3. Inclinação dos terrenos

A Figura 8 apresenta a distribuição de inclinações dos terrenos na bacia onde se observa que a inclinação varia de 0 a 70%, sendo que 56,6% da área encontram-se com inclinações inferiores a 15% e 44,7%, entre 5% e 15% (HEIN, 2000).



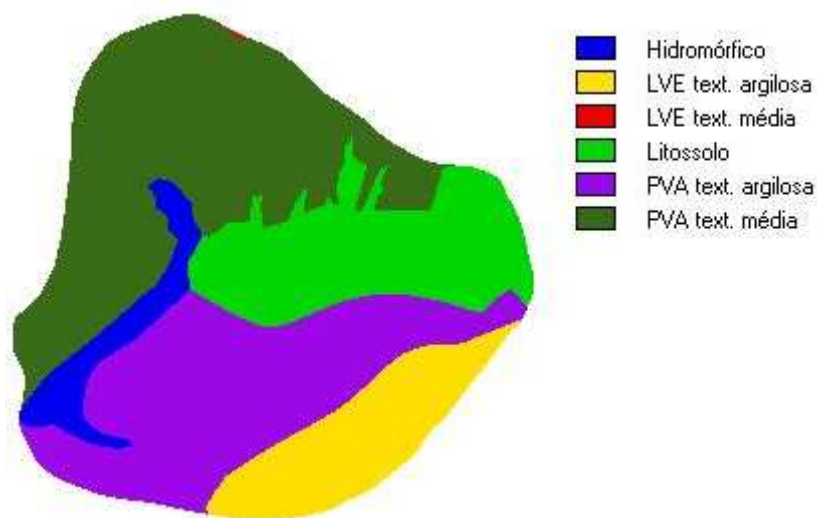
**Figura 7** - Carta de orientação dos terrenos, resolução 10m x 10m da bacia em estudo (Fonte: HEIN, 2000; HEIN e TEIXEIRA FILHO, 2000). Dados originais obtidos de carta planialtimétrica do Instituto Geográfico e Geológico de são Paulo, escala 1:10.000.



**Figura 8** - Carta de inclinação dos terrenos, resolução 10m x 10m da bacia em estudo (Fonte: HEIN, 2000; HEIN e TEIXEIRA FILHO, 2000). Dados originais obtidos de carta planialtimétrica do Instituto Geográfico e Geológico de são Paulo, escala 1:10.000.

#### 4.2.9.4. Solos

Como pode ser observado na Figura 9, na bacia predominam os solos: Latossolo Vermelho Escuro (LVE) de texturas média e argilosa; Podzólico Vermelho Amarelo (PVA), texturas média e argilosa; Hidromórfico e Litossolo.

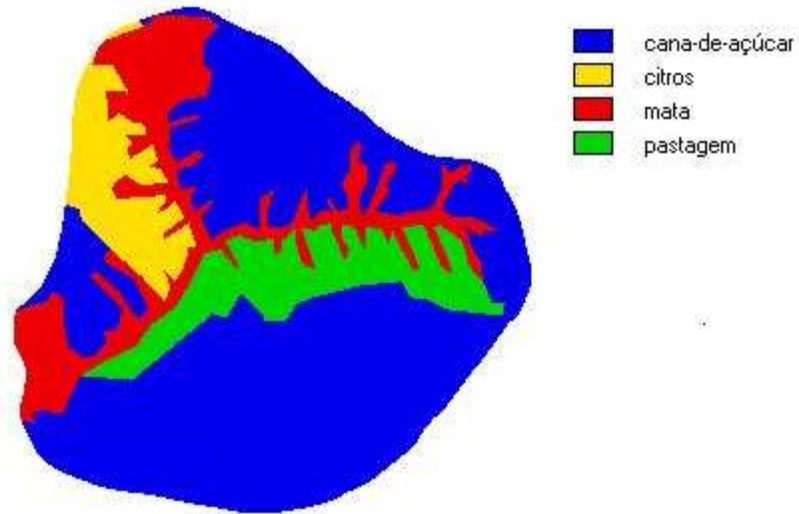


**Figura 9** - Carta de solos, resolução 10m x 10m da bacia em estudo (Fonte: HEIN, 2000; HEIN e TEIXEIRA FILHO, 2000). Dados originais obtidos de carta planialtimétrica do Instituto Geográfico e Geológico de São Paulo, escala 1:10.000.

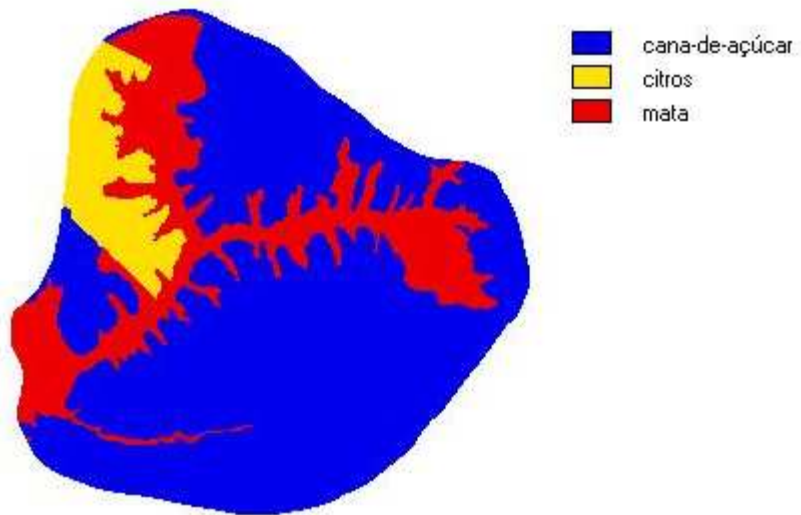
De acordo com HEIN (2000), o solo Hidromórfico cobre 5,5% da área total e encontra-se na parte baixa da bacia, concentrado ao longo do curso d'água principal. O Litossolo ocupa uma área equivalente a 19,3%. O solo encontrado na maior parte da bacia (63,1%) é o Podzólico Vermelho Amarelo, sendo que à direita do curso d'água principal apresenta textura média (35,7%) e à esquerda, textura argilosa (27,4%). Nas porções mais altas da bacia, junto ao divisor de águas, é encontrado Latossolo Vermelho Escuro, sendo que 12,1% é de textura argilosa e 0,05%, de textura média.

#### 4.2.9.5. Uso e ocupação do solo

A cana-de-açúcar é a cobertura vegetal predominante como se pode observar historicamente pelas cartas de uso e ocupação do solo apresentadas na Figura 10,11 e 12.

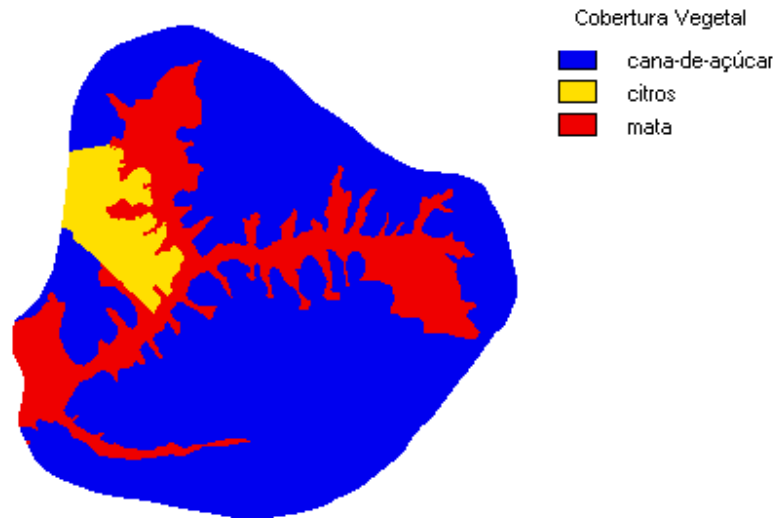


**Figura 10** – Carta de uso do solo – 1978, resolução 10m x 10m (Fonte: HEIN, 2000; HEIN e TEIXEIRA FILHO, 2000). Dados originais obtidos de fotografia aérea, escala 1:30.000.



**Figura 11** – Carta de uso do solo – 1988, resolução 10m x 10m (Fonte: HEIN, 2000; HEIN e TEIXEIRA FILHO, 2000). Dados originais obtidos de fotografia aérea, escala 1:30.000.





**Figura 12** – Carta de uso do solo – 1998, resolução 10m x 10m (Fonte: HEIN, 2000; HEIN e TEIXEIRA FILHO, 2000). Dados originais obtidos de fotografia aérea, escala 1:30.000.

De acordo com HEIN (2000), em 1978, a cultura de cana-de-açúcar ocupava 2,9km<sup>2</sup> de área, a citricultura ocupava 0,4km<sup>2</sup>, a mata ciliar correspondia a 0,8km<sup>2</sup> e, 0,5km<sup>2</sup> eram cobertos por pastagem. Dez anos depois, a cultura canavieira passou a cobrir 3,2 km<sup>2</sup>, a citricultura ocupava, aproximadamente, os mesmos 0,4 km<sup>2</sup> e a mata ciliar aumentou sua área para 1,1 km<sup>2</sup>. No ano de 1998, a bacia encontrava-se coberta com 3,3 km<sup>2</sup> de cana-de-açúcar, 0,3 km<sup>2</sup> de citros e 1,0 km<sup>2</sup> de mata ciliar.

Em porcentagem, a área ocupada pela cultura canavieira variou de 63% em 1978 a 72% em 1998. A citricultura apresentou redução de área de 8% em 1978, para 6% em 1998. Já a mata ciliar apresentou aumento de área ocupada, de 18% em 1978 para 22% em 1998, sendo que em 1988 chegou a abranger 23% da área bacia. Portanto, nota-se que a cana-de-açúcar passou a predominar na área, com a diminuição da área de citros e com a eliminação das áreas de pastagens (HEIN, 2000).

### **4.3. Dados Coletados**

#### **4.3.1. Dados de precipitação**

Em local próximo, mas externo aos limites da bacia, localiza-se uma estação climática que armazena, em intervalos de 10 minutos, valores de precipitação, temperatura do ar, umidade relativa do ar, radiação global, velocidade e direção do vento. Os dados de precipitação utilizados foram os registrados pelo pluviógrafo dessa estação climática.

#### **4.3.2. Dados de vazão**

Na seção de controle da bacia (Figura 13) encontram-se instalados um linígrafo e uma régua linimétrica. A leitura da régua era realizada uma vez ao dia, no período da manhã, por um funcionário da Faculdade de Engenharia Civil – UNICAMP (Figura 14).

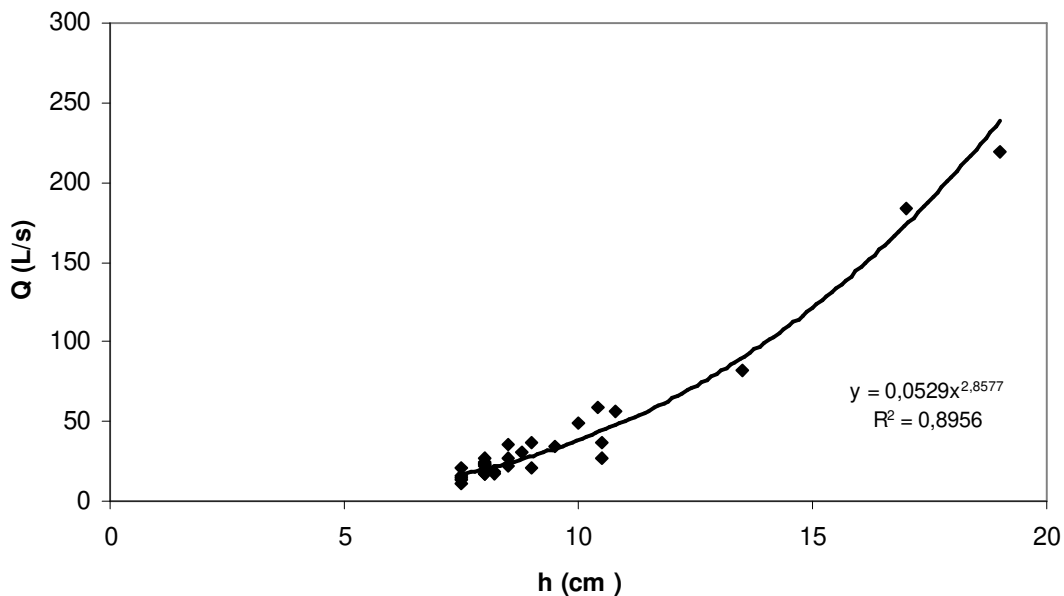


**Figura 13** – Vista da seção de controle da bacia.



**Figura 14** – Detalhe da medida da régua linimétrica na seção de controle da bacia.

Os valores de vazão foram calculados de acordo com a curva chave (Figura 15) determinada por MARTINS (2001).



**Figura 15** – Gráfico de altura da lâmina de água (h) versus vazão (Q) para determinação da curva chave (Fonte: MARTINS, 2001).

#### 4.3.3. Período de dados

Para realização deste trabalho foram utilizados dados de precipitação e vazão correspondentes ao período de fevereiro de 1999 a abril de 2001.

#### **4.4. Modelagem**

##### **4.4.1. Modelo TOPMODEL**

###### **4.4.1.2. Escolha dos eventos**

Os eventos selecionados para a realização das simulações utilizando TOPMODEL foram aqueles que se enquadraram aos seguintes critérios:

- 1) eventos cuja precipitação alterasse sensivelmente os valores de vazão;
- 2) eventos cujas vazões não fossem afetadas pelo remanso do Ribeirão Pinhal.

###### **4.4.1.3. Versão do modelo**

Foi utilizada o modelo TOPMODEL para Windows, versão 97.01, distribuído pela Universidade de Lancaster, Reino Unido, disponível para download na internet ([www.es.lancs.ac.uk/hfdg/topmodel.html](http://www.es.lancs.ac.uk/hfdg/topmodel.html)).

A versão para Windows TOPWIN utiliza um arquivo principal, denominado Calib.prj o qual contém as seguintes informações: nome da bacia, local no computador onde se encontram os arquivos de parâmetros, de dados e do índice topográfico.

O arquivo de parâmetros possui a extensão Cat e contém os valores iniciais dos parâmetros do modelo necessários para realização das simulações. O arquivo de dados contém os valores referentes à precipitação, evapotranspiração e vazão observada e, possui extensão PEQ. O arquivo que armazena as informações referentes ao modelo numérico do terreno e apresenta extensão ATB.

Cada evento a ser simulado é considerado como um projeto individual, o que torna necessária a montagem de um arquivo Calib.prj específico para cada um dos eventos. Como forma de ilustração, tem-se um exemplo de apresentação geral deste arquivo usado no presente estudo:

Calib.prj  
Bacia cana  
C:\meus\camila\paraex1.Cat  
C:\meus\camila\dados1.PEQ  
C:\meus\camila\Map.ATB

#### **4.4.1.4. Dados de entrada**

##### **4.4.1.4.1. Índice Topográfico**

###### **4.4.1.4.1.1. Modelo numérico de terreno (MNT)**

O modelo numérico utilizado para gerar o índice topográfico da bacia necessário às simulações com o modelo TOPMODEL, apresenta resolução de 30m x 30m, o qual gerou um arquivo de dados com 95 colunas e 92 linhas. O TOPMODEL possui restrição quanto ao número de linhas e colunas do arquivo de dados do MNT, sendo o máximo admitido 100 linhas e 100 colunas.

###### **4.4.1.4.2. Dados de precipitação**

Foram utilizados os dados horários de precipitação, obtidos a partir dos registros do pluviógrafo da estação climática.

###### **4.4.1.4.3. Dados de Evapotranspiração**

O modelo TOPMODEL apresenta uma sub-rotina própria que calcula a evapotranspiração potencial baseada em curvas senoidais diárias, cuja entrada é o dia do ano. Esta sub-rotina tem seus parâmetros ajustados para o Hemisfério Norte, fazendo com que seu uso seja descartado quando se trata de locais do Hemisfério Sul.

Neste trabalho, foi atribuído valor zero à evapotranspiração potencial por se considerar que o intervalo de tempo utilizado nas simulações é pequeno e, com valores altos de umidade relativa, o potencial de evaporação nos eventos é muito baixo.

###### **4.4.1.4.4. Vazão observada**

Para realizar a comparação entre dados simulados e observados, o modelo requer dados de vazão observada, os quais foram determinados de acordo com o item 4.3.2, para intervalos de 1 hora.

###### **4.4.1.4.5. Parâmetros do modelo**

O modelo TOPMODEL, na versão TOPWIN, necessita de valores para os seguintes parâmetros:  $m$ , parâmetro de armazenamento exponencial ( $m$ );  $T_o$ , transmissividade lateral

saturada ( $\text{m}^2/\text{h}$ ); CHV, velocidade de propagação em canal ( $\text{m}/\text{h}$ );  $\text{SR}_{\text{max}}$ , capacidade de água disponível na zona das raízes ( $\text{m}$ );  $\text{SR}_0$ , déficit inicial de umidade na zona das raízes ( $\text{m}$ ).

Por não se ter medidas de campo que fornecessem um indicativo dos valores dos parâmetros requeridos pelo modelo TOPMODEL, foram adotados os valores iniciais utilizados por FERREIRA (2004) para dar início ao processo de simulação. A adoção dos valores de FERREIRA (2004) foi embasada na consideração que a bacia ( $21\text{km}^2$ ) estudada pela autora é, assim como a bacia ( $4,6\text{km}^2$ ) do presente trabalho, uma bacia rural coberta predominantemente pela cultura de cana-de-açúcar.

## **4.4.2. Simulações**

### **4.4.2.1. Aplicação do modelo TOPMODEL**

#### **4.4.2.1.1. Calibração do Modelo**

##### **4.4.2.1.1.1. Eventos**

O procedimento de calibração do modelo foi realizado manualmente, por tentativa e erro, com os eventos que se enquadraram aos seguintes critérios:

- 1) o número de eventos de calibração não poderia ultrapassar  $1/3$  da quantidade total de eventos;
- 2) eventos que fossem representativos da variação das precipitações;
- 3) eventos representativos da variação das vazões.

##### **4.4.2.1.1.2. Ajuste dos parâmetros**

O objetivo do processo de calibração foi determinar um conjunto de parâmetros que melhor caracterizasse a bacia em estudo, sendo realizado em duas etapas. Na primeira etapa, foram determinados os valores dos parâmetros comuns, que melhor se ajustaram a todos os eventos de calibração: fator de forma ( $m$ ), transmissividade lateral saturada ( $T_0$ ), velocidade de propagação do canal (CHV) e capacidade máxima de armazenamento na zona radicular ( $\text{SR}_{\text{max}}$ ). Na segunda etapa, o valor do parâmetro déficit inicial de umidade na zona radicular ( $\text{SR}_0$ ) foi determinado, individualmente, para cada evento. O critério para o ajuste dos parâmetros considerou os seguintes valores resultantes das simulações, em ordem de importância:

- 1) valor de vazão máxima

- 2) valor de eficiência do modelo
- 3) valor do volume total
- 4) valor do coeficiente de escoamento

#### **4.4.2.1.2. Validação do modelo**

##### **4.4.2.1.2.1. Eventos**

Para executar o processo de validação do modelo TOPMODEL na bacia, foram utilizados os eventos que não satisfizeram os critérios para escolha de eventos de calibração.

##### **4.4.2.1.2.2. Ajuste dos parâmetros**

Para validar o modelo foram utilizados os valores calibrados dos parâmetros: fator de forma ( $m$ ), transmissividade lateral saturada ( $T_0$ ), velocidade de propagação do canal ( $CHV$ ) e capacidade máxima de armazenamento na zona radicular ( $SR_{max}$ ). O valor do parâmetro déficit inicial de umidade na zona radicular ( $SR_0$ ) foi determinado, individualmente, para cada evento.

#### **4.4.2.2. Aplicação do modelo TOPMODEL em conjunto a um modelo de interceptação de chuva pela vegetação**

O modelo TOPMODEL foi aplicado na bacia estudada em conjunto a um modelo de interceptação de chuva pela cobertura vegetal em duas fases de acordo com as seguintes hipóteses para a distribuição da precipitação interceptada:

Hipótese 1 (H1) – A precipitação interceptada ( $P_p$ ) é distribuída uniformemente ao longo do tempo. Assim, cada valor de precipitação ao longo do tempo do evento em análise ( $P_{n, n = 1 \text{ a } n}$ ) é multiplicado por um coeficiente de correção  $\phi$ . Esse coeficiente é calculado por meio da relação entre a precipitação interceptada e incidente.

Hipótese 2 (H2) – A quantidade total de precipitação interceptada ( $P_p$ ) durante o evento analisado é subtraída do primeiro valor de chuva do evento ( $P_1$ ), ou, dos primeiros valores caso  $P_p$  seja maior que  $P_n$ .

Para cada uma das hipóteses (H1 e H2) realizou-se os processos de calibração e validação do modelo.

#### 4.4.2.2.1. Modelo de Interceptação de Chuva

O modelo utilizado para cálculo da chuva interceptada pela cobertura vegetal é o modelo linear proposto por CASTILHO (2000), no qual a interceptação é função da precipitação incidente e do IAF (Índice de Área Foliar), o qual representa o grau de desenvolvimento e a estrutura do espécime cultivado.

##### 4.4.2.2.1.1. Índice de Área Foliar

Não foram realizadas medidas do Índice de Área Foliar (IAF) na bacia em estudo. Assim, O IAF foi estimado fazendo uso do modelo proposto por LULU e TEIXEIRA FILHO (1999) em trabalho conduzido em parcela experimental cultivada com cana-de-açúcar. O IAF foi determinado pela equação:

$$IAF = \frac{IAF_{max}}{1 + \exp(a - b \cdot T)} \quad (25)$$

sendo  $T$  é o tempo em dias acumulados (contados em dias corridos a partir de 1° de janeiro) e, os parâmetros  $a$  e  $b$  valem 6,07 e 0,047, respectivamente.

O valor de  $IAF_{max}$  foi adotado como sendo o valor médio da superfície do Índice de Área Foliar medido na parcela experimental do trabalho realizado por CASTILHO (2000). O modelo de LULU e TEIXEIRA FILHO (1999) foi considerado como sendo representativo das condições apresentadas na bacia em estudo.

Para aplicação do modelo de IAF, admitiu-se que o corte da cana-de-açúcar nos talhões da bacia tem início no mês de maio e dura 4 meses (maio, junho, julho, agosto). Portanto, o período de corte da cultura acontece durante 16 semanas por ano. O IAF foi calculado semanalmente para um período de doze meses, tendo como início o mês de maio. O valor do IAF utilizado na determinação da precipitação interceptada, na data de cada evento, foi a média das 16 semanas.

##### 4.4.2.2.1.2. Interceptação vegetal

O modelo de interceptação vegetal apresentado por CASTILHO (2000) foi desenvolvido a partir de dados de precipitação incidente ( $P_I$ ) e precipitação que atravessa a vegetação atingindo o solo – lâmina de água no solo ( $P_L$ ). O modelo relaciona a quantidade de chuva que chega ao solo à precipitação incidente, sendo expresso sob a forma:

$$P_L = a P_I + b \quad (26)$$



sendo  $a$  e  $b$  são os coeficientes angular e linear, respectivamente.

O coeficiente angular está relacionado ao índice de área foliar da cultura, sendo obtido pela equação:

$$y = -0,0456 x + 0,06776 \quad (27)$$

em que  $x$  representa o IAF e  $y$ , o coeficiente angular ( $a$ ) do modelo de interceptação vegetal.

O coeficiente linear ( $b$ ) representa as características médias da cultura estudada, apresentando o valor fixo de 0,10.

A quantidade de chuva interceptada pela cultura ( $P_p$ ) foi obtida subtraindo da precipitação incidente ( $P_i$ ) o valor da lâmina de água no solo ( $P_L$ ).

Na aplicação do modelo TOPMODEL no presente estudo, a precipitação interceptada foi corrigida ( $P_{pc}$ ), considerando a parcela de escoamento pelo tronco ( $EC$ ), ou seja,  $P_{pc} = P_p - EC$ . Os valores de precipitação utilizados nos eventos simulados consideraram as parcelas que efetivamente chegam ao solo  $P_L$  e  $EC$ . Assim,  $PS = P_L + EC$ .

#### **4.4.2.2.1.3. Escoamento pelo tronco**

Considerou-se que a parcela da precipitação que atinge o solo por meio de escoamento pelo colmo, no caso da cultura de cana-de-açúcar, é relevante quando se trata de áreas mais extensas. Devido ao fato de que tal parcela não foi considerada no modelo de interceptação adotado, buscou-se na literatura dados que fornecessem uma estimativa do valor de escoamento pelo colmo na cultura predominante da bacia.

Os dados de escoamento pelo colmo, levantados por VIEIRA (1982) melhor se ajustaram a um polinômio de segundo grau  $y = 3,39675 + 0,91974x - 0,00507x^2$ , no qual  $y$  representa o escoamento pelo colmo em relação à precipitação total em porcentagem e  $x$ , os dias acumulados após o início da medição do experimento.

Todavia, a equação proposta por VIEIRA (1982) não está relacionada diretamente ao grau de desenvolvimento da cultura. Assim, foi ajustado um modelo que relaciona o escoamento pelo colmo à precipitação incidente.

#### **4.4.2.2.2. Calibração do Modelo**

##### **4.4.2.2.2.1. Eventos**

O procedimento de calibração do modelo foi realizado manualmente, por tentativa e erro, com os eventos definidos no item 4.4.2.1.1.1.

##### **4.4.2.2.2.2. Ajuste dos parâmetros**

O ajuste dos parâmetros foi executado de forma idêntica a descrita no item 4.4.2.1.1.2.

#### **4.4.2.2.3. Validação do modelo**

##### **4.4.2.2.3.1. Eventos**

O processo de validação do modelo foi realizado com os eventos definidos no item 4.4.2.1.2.1.

##### **4.4.2.2.3.2. Ajuste dos parâmetros**

O ajuste dos parâmetros na validação do modelo foi executado de forma idêntica a descrita no item 4.4.2.1.2.2.

## 5. RESULTADOS

### 5.1. Modelagem

#### 5.1.1. Modelo TOPMODEL

##### 5.1.1.1. Eventos analisados

Para o período de dados estudados (fevereiro de 1999 a abril de 2001), 15 eventos se enquadraram aos critérios preestabelecidos (item 4.4.1.2) e estão relacionados na tabela 1.

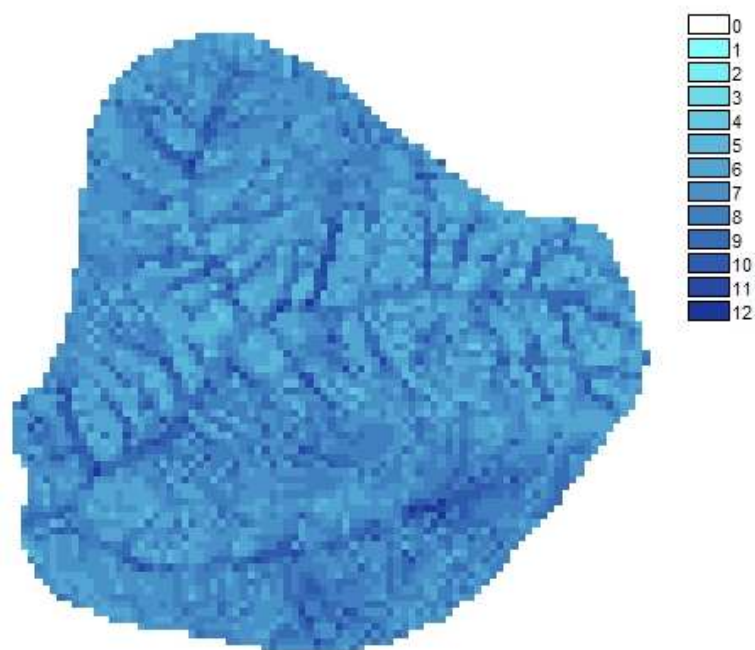
**Tabela 1** - Eventos escolhidos para aplicação do modelo TOPMODEL: período, duração, precipitação total ( $P_T$ ) e vazão máxima observada ( $Q_{\max\text{obs}}$ ).

Evento	Período	Duração (h)	$P_T$ (mm)	$Q_{\max\text{obs}}$ (L/s)
1	13/2/1999 a 14/2/1999	13	23,9	298,8
2	20/2/1999 a 21/2/1999	23	76,2	304,8
3	27/2/1999 a 28/2/1999	18	9,1	113,9
4	10/12/1999 a 11/12/1999	22	16,5	87,6
5	11/12/1999 a 12/12/1999	24	23,4	101,5
6	13/12/1999 a 14/12/1999	17	21,1	158,6
7	14/12/1999	22	10,7	82,9
8	16/1/2000 a 17/1/2000	26	16,3	71,9
9	17/1/2000 a 18/1/2000	21	19,6	132,3
10	25/1/2000 a 26/1/2000	30	17,3	67,6
11	26/1/2000 a 27/1/2000	26	3,8	61,4
12	25/6/2000 a 26/6/2000	19	11,7	48,1
13	05/3/2001 a 06/3/2001	15	22,4	89,3
14	08/3/2001 a 09/3/2001	16	25,4	120,7
15	10/03/2001	13	7,9	56,8

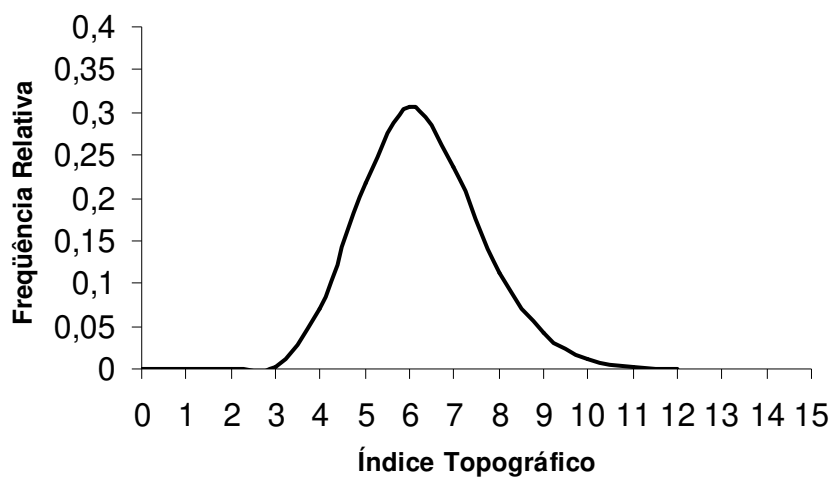
A tabela 1 mostra que os valores de precipitação total dos eventos variaram de 3,8mm (evento 11) a 76,2mm (evento 2); o máximo valor de vazão de pico observado foi de 304,8L/s (evento 2) e o mínimo, 48,1L/s (evento 12).

### 5.1.1.2. Índice Topográfico

Os valores do índice topográfico gerados pelo modelo TOPMODEL aplicado na bacia analisada constam nas figuras 16 e 17.



**Figura 16** – Padrão espacial da distribuição do índice topográfico na bacia.



**Figura 17** – Distribuição da frequência relativa do índice topográfico na bacia.

## 5.1.2. Simulações

### 5.1.2.1. Aplicação do modelo TOPMODEL

#### 5.1.2.1.1. Calibração do modelo

##### 5.1.2.1.1.1. Eventos

Seguindo os critérios estabelecidos para a escolha dos eventos para uso na calibração do modelo TOPMODEL (item 4.4.2.1.1.1), foram selecionados 5 eventos (tabela 2), os quais representam 33,3% do número total de eventos disponíveis para serem usados no estudo.

**Tabela 2** – Eventos selecionados para o processo de Calibração - Período, duração, precipitação total ( $P_T$ ), vazão máxima observada ( $Q_{\max\text{obs}}$ ), volume escoado observado ( $V_{\text{esc}\text{obs}}$ ), coeficiente de escoamento observado (Coef. de  $\text{esc}_{\text{obs}}$ ).

Evento	Período	Duração (h)	$P_T$ (mm)	$Q_{\max\text{obs}}$ (L/s)	$V_{\text{esc}\text{obs}}$ (L)	Coef. de $\text{esc}_{\text{obs}}$ (%)
1	13/2/1999 a 14/2/1999	13	23,9	298,8	$3,96 \times 10^6$	3,6
2	16/1/2000 a 17/1/2000	26	16,3	85,03	$5,32 \times 10^6$	7,1
3	05/3/2001 a 06/3/2001	15	22,4	89,3	$3,02 \times 10^6$	2,9
4	08/3/2001 a 09/3/2001	16	25,4	120,7	$3,57 \times 10^6$	3,0
5	10/3/2001	13	7,9	56,8	$2,42 \times 10^6$	6,7

Ao analisar a tabela 2, verifica-se que os eventos apresentaram valores de precipitação total inferiores a 30mm, sendo o máximo de 25,4mm (evento 4) e o mínimo de 7,9mm (evento 5). A precipitação máxima observada não gerou o maior valor de vazão de pico, o qual ocorreu no evento 1 ( $P_T = 23,9\text{mm}$ ). Já o menor valor de precipitação, ocasionou o mínimo valor de vazão de pico. Os valores de volume escoado variaram de  $2,42 \times 10^6$  L a  $5,32 \times 10^6$  L. O coeficiente de escoamento variou de 2,9% a 7,1% sendo que os baixos valores podem ser atribuídos a as condições de escolha dos eventos (item 4.4.1.2).

##### 5.1.2.1.1.2. Ajuste dos parâmetros

Seguindo os critérios determinados para o ajuste dos parâmetros (vazão máxima, eficiência, volume escoado, coeficiente de escoamento) a serem utilizados nas simulações com o modelo TOPMODEL, foi estabelecido, por tentativa e erro, um conjunto de parâmetros (m,

$T_0$ , CHV e  $SR_{max}$ ), tendo como valores iniciais os usados por FERREIRA (2004). A tabela 3 apresenta os valores finais destes parâmetros estabelecidos no processo de calibração.

**Tabela 3** – Valores dos parâmetros do modelo TOPMODEL obtidos no processo de calibração.

Parâmetro	Valor adotado	Unidade
Armazenamento exponencial (m)	0,1	m
Transmissividade lateral saturada ( $T_0$ )	3,0042	$m^2h^{-1}$
Velocidade de Propagação do canal (CHV)	2000	$mh^{-1}$
Capacidade máxima de armazenamento na zona radicular ( $SR_{max}$ )	0,2	m

Para o parâmetro déficit inicial de umidade na zona radicular ( $SR_0$ ) buscou-se um valor que melhor se ajustasse às condições de cada um dos eventos, o que resultou em valores que variaram de 0,0030m a 0,0108m. A tabela 4 apresenta os valores do déficit inicial de umidade na zona radicular ( $SR_0$ ) e também os valores de eficiência de Nash e Sucliffe (E) dos eventos de calibração.

**Tabela 4** – Valores do parâmetro déficit inicial de umidade na zona radicular ( $SR_0$ ) do modelo TOPMODEL e de eficiência de Nash e Sucliffe (E) dos eventos de calibração.

Evento	$SR_0$ (m)	E (%)
1	0,0030	96
2	0,0084	66
3	0,0108	83
4	0,0055	92
5	0,0060	64
<b>Valores médios</b>	<b>0,00674</b>	<b>80,2</b>

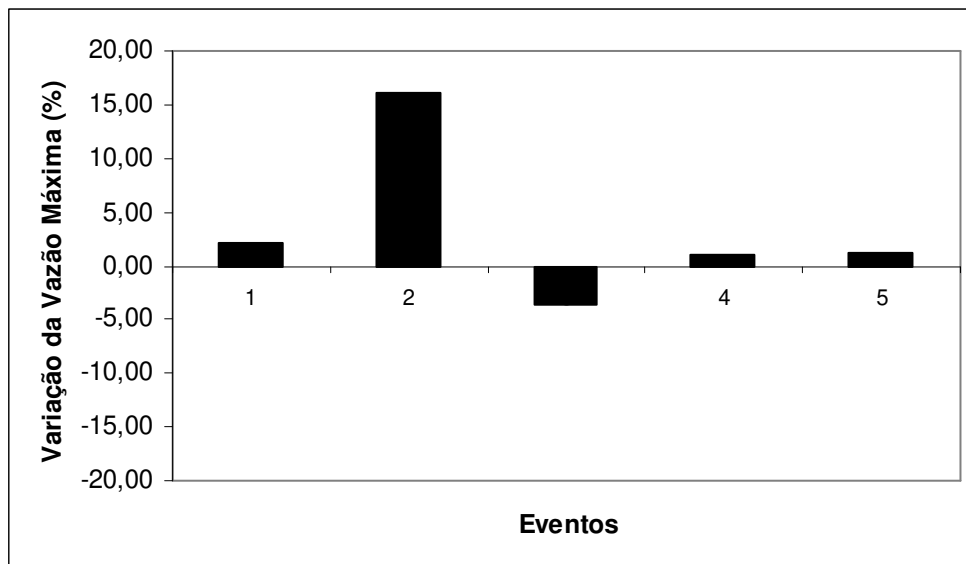
### 5.1.2.1.1.3. Resultados

Os principais resultados obtidos nas simulações de calibração, utilizando os parâmetros estabelecidos (tabelas 3 e 4) estão apresentados na tabela 5.

**Tabela 5**– Eventos de Calibração - Valores de duração dos eventos, precipitação total ( $P_T$ ), vazão máxima simulada ( $Q_{\max\text{sim}}$ ), volume escoado simulado ( $V_{\text{esc}_{\text{sim}}}$ ), coeficiente de escoamento simulado (Coef. de  $\text{esc}_{\text{sim}}$ ).

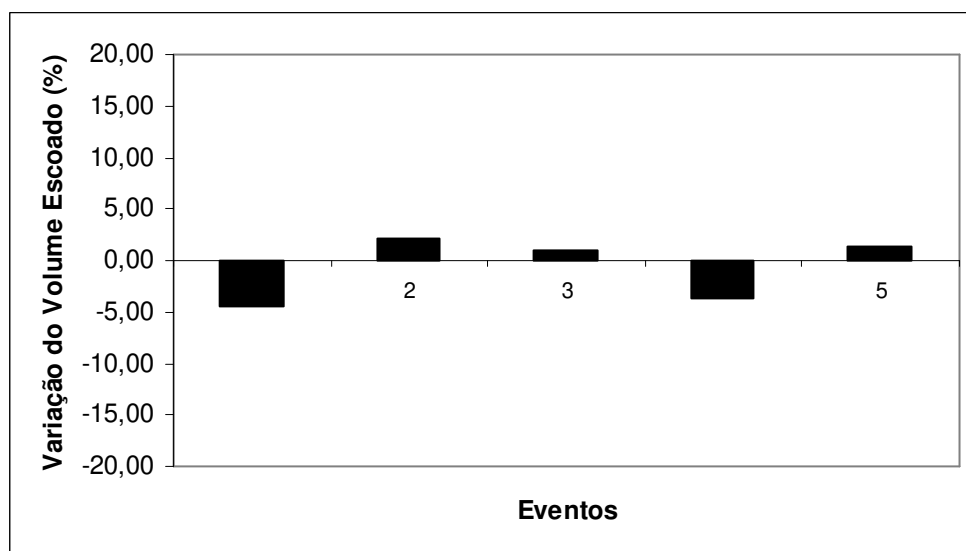
Evento	Período	Duração (h)	$P_T$ (mm)	$Q_{\max\text{sim}}$ (L/s)	$V_{\text{esc}_{\text{sim}}}$ (L)	Coef. de $\text{esc}_{\text{sim}}$ (%)
1	13/2/1999 a 14/2/1999	13	23,9	292,6	$4,14 \times 10^6$	3,8
2	16/1/2000 a 17/1/2000	26	16,3	72,4	$5,21 \times 10^6$	7,0
3	05/3/2001 a 06/3/2001	15	22,4	92,6	$2,99 \times 10^6$	2,9
4	08/3/2001 a 09/3/2001	16	25,4	119,5	$3,70 \times 10^6$	3,1
5	10/3/2001	13	7,9	56,1	$2,38 \times 10^6$	6,6

Os valores de vazões máximas simuladas e a variação entre valores observados e simulados, calculada pela expressão:  $([Q_{\max\text{obs}} - Q_{\max\text{sim}}] / Q_{\max\text{obs}}) \times 100$ , são mostrados na tabela 5 e na figura 18, respectivamente. Os valores máximo (292,6L/s) e mínimo (56,1L/s) de vazão de pico simulados ocorreram nos eventos 1 e 5, respectivamente. Este resultado está próximo dos valores observados, porém com subestimação dos valores observados para ambos os eventos. Os volumes escoados simulados também apresentaram resultados semelhantes aos observados, sendo valor máximo ocorrendo no evento 2 e mínimo no evento 5. O valor de escoamento simulado para o evento 2 apresentou pequena subestimação ( $0,01 \times 10^6$ L), diferentemente do ocorrido no evento 5, para o qual a simulação resultou em subestimação ( $0,04 \times 10^6$ L). Os valores de coeficiente de escoamento simulados variaram de 2,9% a 7,0%, assim como os valores observados. Na figura 18 nota-se que o único evento para o qual o valor de vazão máxima simulado foi superior ao observado foi o evento 3, cuja variação foi de -3,6. Para os demais eventos, o modelo mostrou subestimação, com valores variando de 0,9% a 16,2%, ou seja, em 80% dos eventos de calibração o valor da vazão máxima foi subestimado. A variação média entre as vazões máximas observadas e simuladas foi de 3,4% e, em módulo, 4,8%.



**Figura 18** – Variação da vazão máxima observada e simulada para os eventos de calibração.

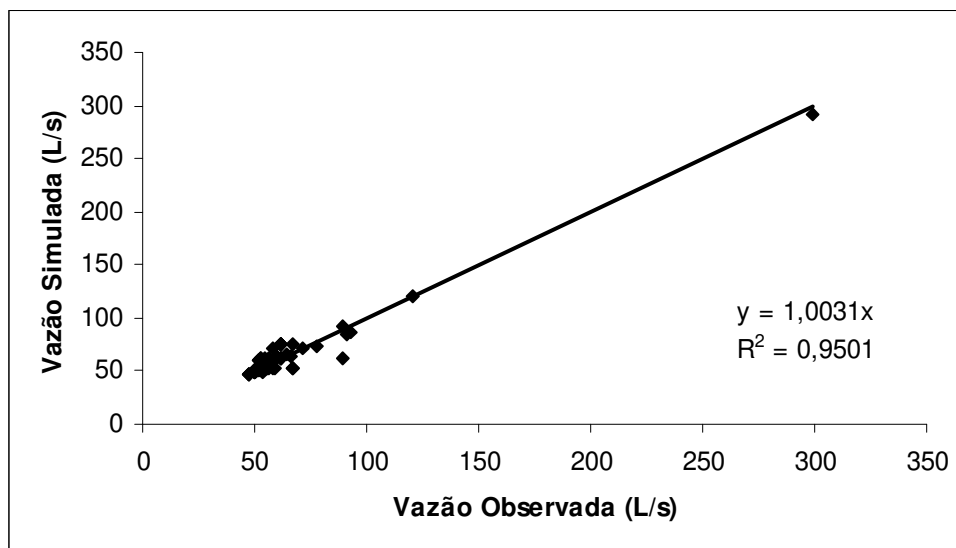
A variação entre os valores de escoamento observado e simulado, calculada pela expressão:  $([V_{\text{escobs}} - V_{\text{escsim}}] / V_{\text{escobs}}) \times 100$ , é apresentada na figura 19, na qual se observa que os eventos 1 e 4 apresentaram valores de volume escoado simulados superiores aos observados, sendo o evento 1 o que apresentou maior diferença (4,5%, em módulo).



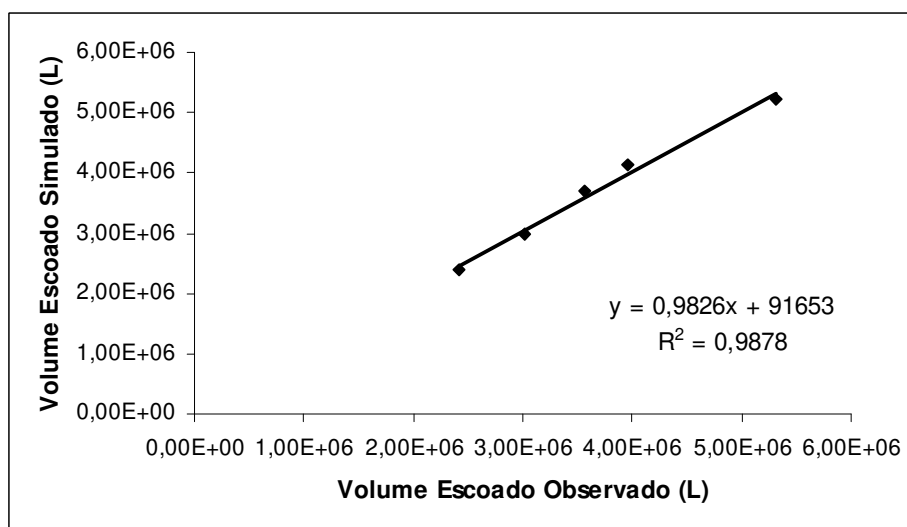
**Figura 19** – Variação do volume escoado observado e simulado para os eventos de calibração.



Considerando todos os eventos de calibração, a simulação foi avaliada pela consistência entre os dados observados e simulados de vazão e de volume escoado, resultando nas Figuras 20 e 21.

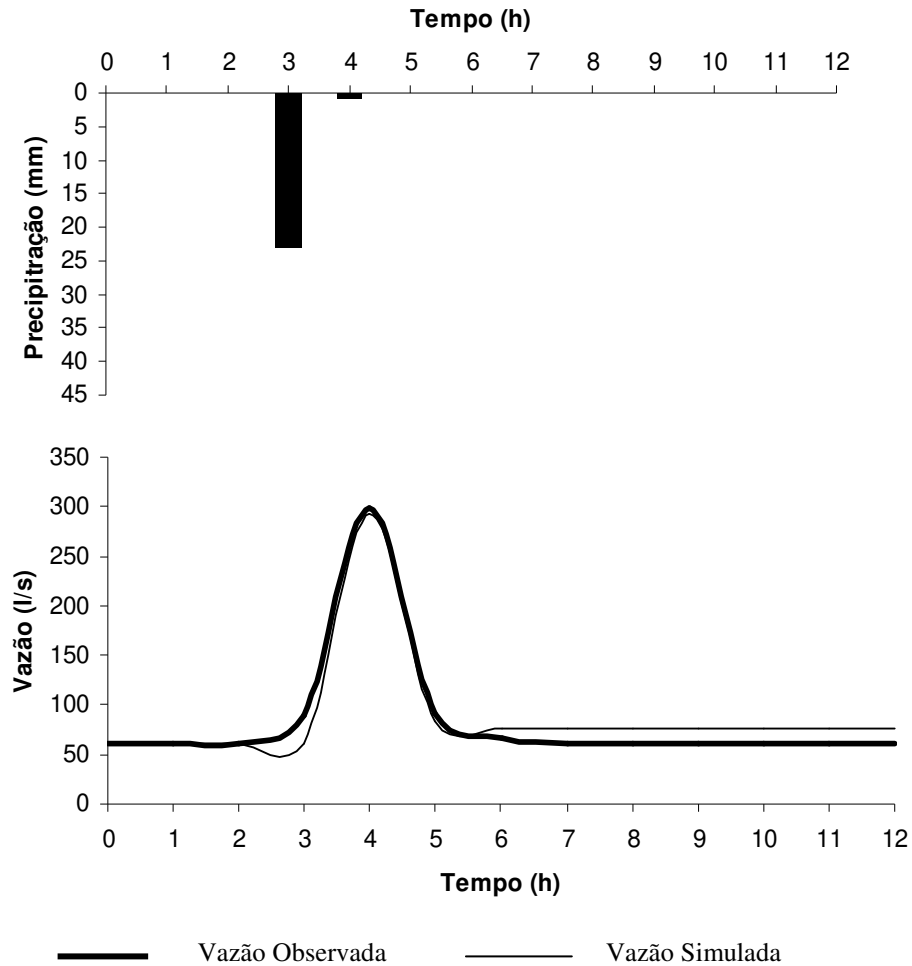


**Figura 20** – Vazão horária observada versus vazão horária simulada para os eventos de calibração do TOPMODEL na bacia e modelo de regressão linear entre os valores.

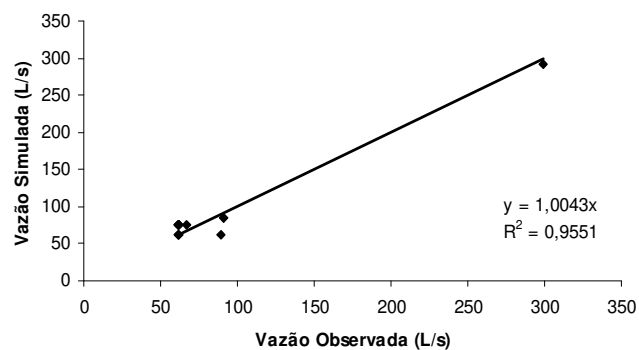


**Figura 21** – Volume escoado observado versus volume escoado simulado para os eventos de calibração do TOPMODEL na bacia e modelo de regressão linear entre os valores.

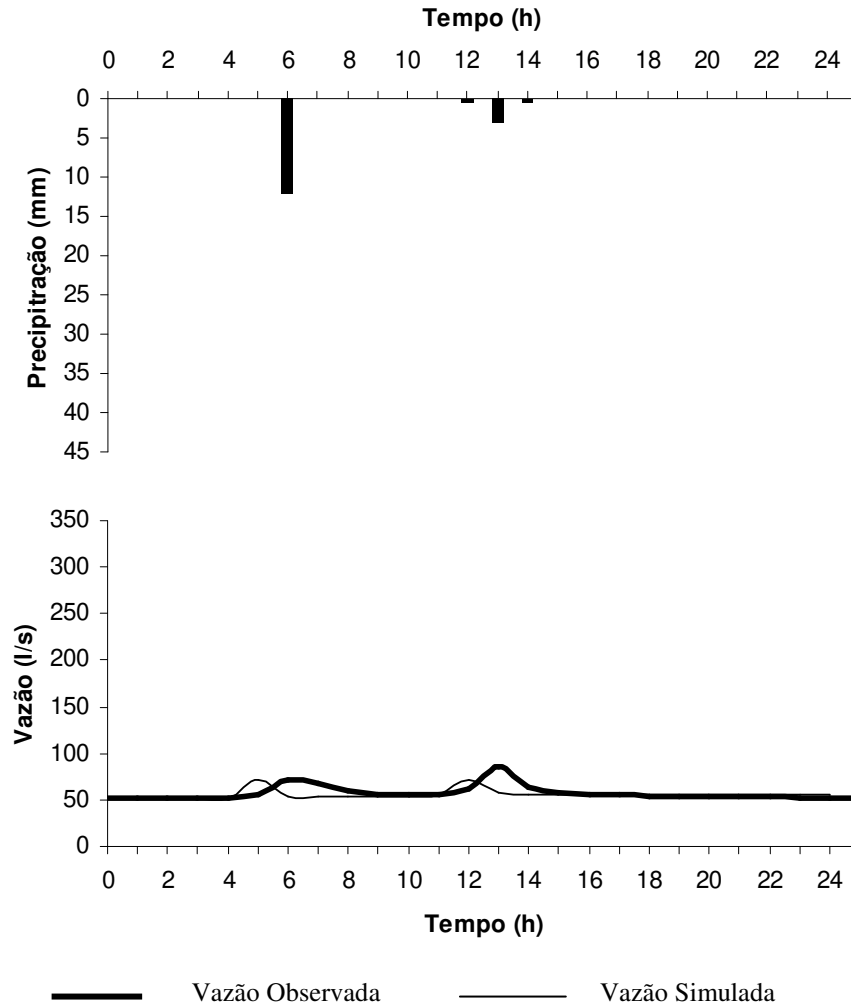
A seguir, cada evento é apresentado isoladamente sendo que, os resultados obtidos são mostrados nas figuras 22, 24, 26, 28 e 30, nas quais podem ser observados os ietogramas e hidrogramas. A avaliação do resultado da simulação pela relação entre os dados observados e simulados de vazão foi efetuada a partir das figuras 23, 25, 27, 29 e 31. Todos os ietogramas e hidrogramas são mostrados em uma única escala para efeitos de comparação. No capítulo apêndices, item A.1, os mesmo são apresentados em escala diferenciada permitindo uma melhor visualização (figuras 132 a 136).



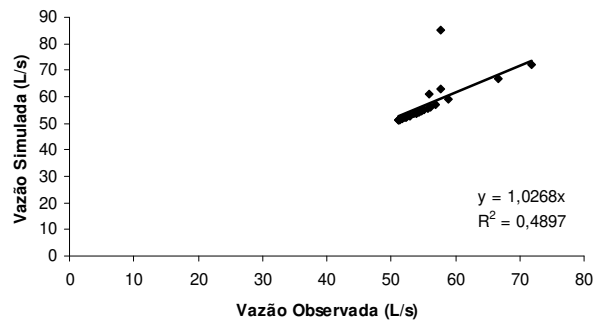
**Figura 22** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 1 (13/2/1999 a 14/2/1999) utilizado no processo de calibração na aplicação do modelo TOPMODEL.



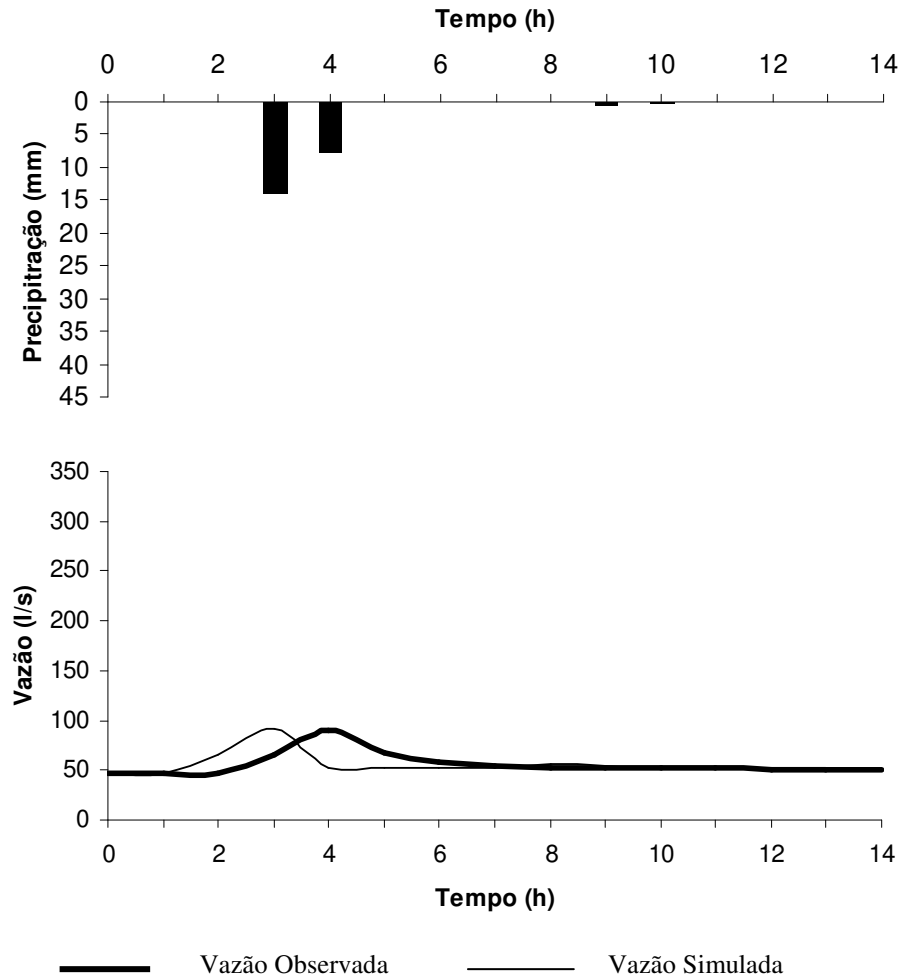
**Figura 23** - Vazão horária observada versus vazão horária simulada para o evento 1 de calibração do TOPMODEL na bacia e respectivo modelo de regressão linear entre os valores.



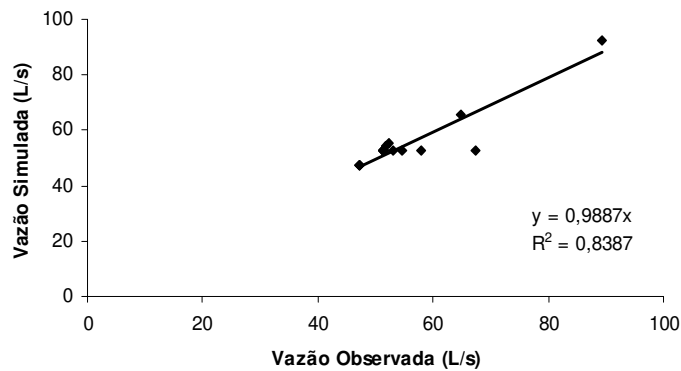
**Figura 24** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 2 (16/1/2000 a 17/12/2000) utilizado no processo de calibração na aplicação do modelo TOPMODEL.



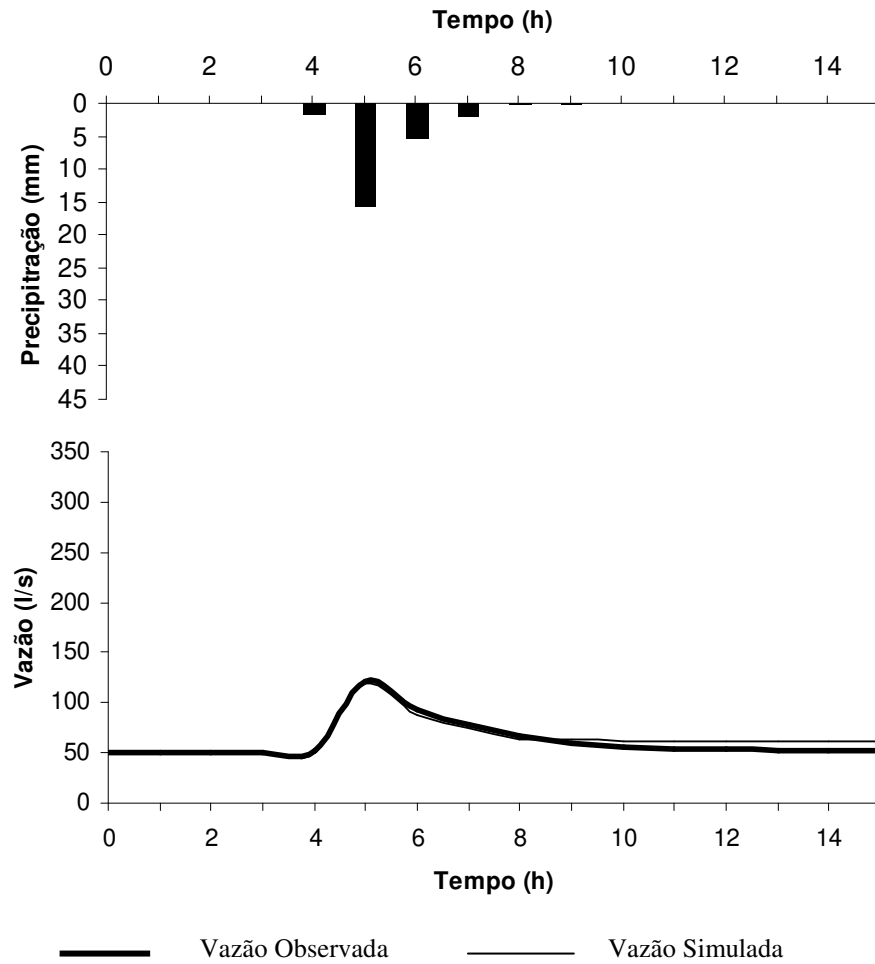
**Figura 25** - Vazão horária observada versus vazão horária simulada para o evento 2 de calibração do TOPMODEL na bacia e respectivo modelo de regressão linear entre os eventos.



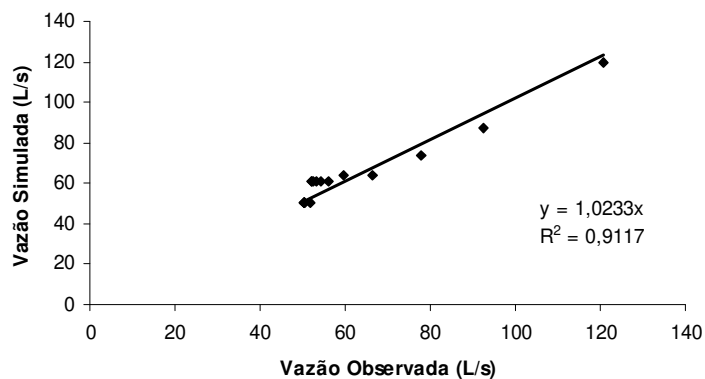
**Figura 26** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 3 (05/3/2001 a 06/3/2001) utilizado no processo de calibração na aplicação do modelo TOPMODEL.



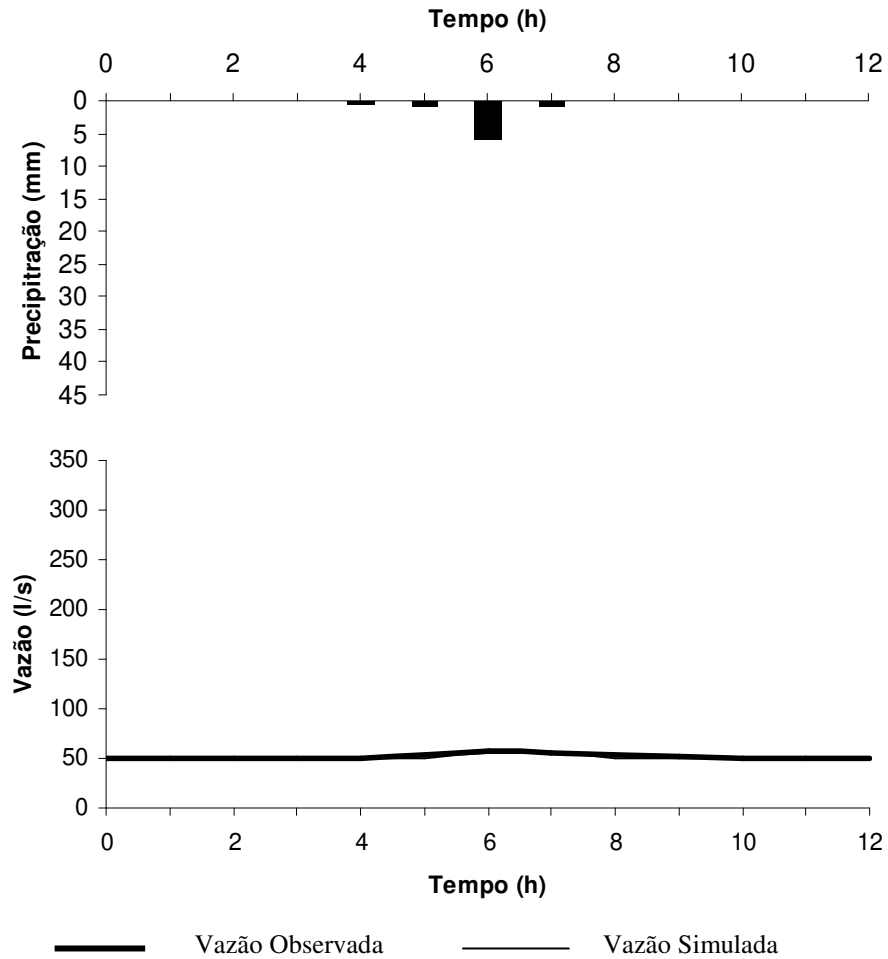
**Figura 27** - Vazão horária observada versus vazão horária simulada para o evento 3 de calibração do TOPMODEL na bacia e respectivo modelo de regressão linear entre os valores.



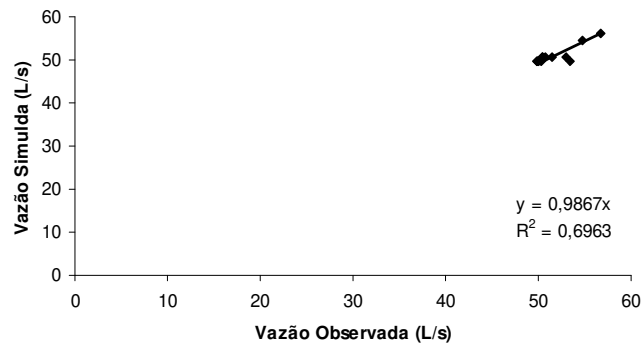
**Figura 28** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 4 (08/3/2001 a 09/3/2001) utilizado no processo de calibração na aplicação do modelo TOPMODEL.



**Figura 29** - Vazão horária observada versus vazão horária simulada para o evento 4 de calibração do TOPMODEL na bacia e respectivo modelo de regressão linear entre os valores.



**Figura 30** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 5 (10/3/20001) utilizado no processo de calibração na aplicação do modelo TOPMODEL.



**Figura 31** - Vazão horária observada versus vazão horária simulada para o evento 5 de calibração do TOPMODEL na bacia e respectivo modelo de regressão linear entre os valores.

### 5.1.2.1.2. Validação do modelo

#### 5.1.2.1.2.1. Eventos

Seguindo os critérios estabelecidos para a escolha dos eventos para uso na validação do modelo TOPMODEL (item 4.4.2.1.2.1), foram selecionados 10 eventos (tabela 6), os quais representam 66,7% do número total de eventos disponíveis para serem usados no estudo.

**Tabela 6** – Eventos selecionados para o processo de validação - Período dos eventos, duração, precipitação total ( $P_T$ ), vazão máxima observada ( $Q_{\max\text{obs}}$ ), volume escoado observado ( $V_{\text{esc}_{\text{obs}}}$ ), coeficiente de escoamento observado (Coef. de  $\text{esc}_{\text{obs}}$ ).

Evento	Período	Duração (h)	$P_T$ (mm)	$Q_{\max\text{obs}}$ (L/s)	$V_{\text{esc}_{\text{obs}}}$ (L)	Coef. de $\text{esc}_{\text{obs}}$ (%)
1	20/2/1999 a 21/2/1999	23	76,2	304,8	$7,56 \times 10^6$	2,2
2	27/2/1999 a 28/2/1999	18	9,1	113,9	$4,49 \times 10^6$	10,7
3	10/12/1999 a 11/12/1999	22	16,5	87,5	$5,86 \times 10^6$	7,7
4	11/12/1999 a 12/12/1999	24	23,4	101,5	$6,62 \times 10^6$	6,2
5	13/12/1999 a 14/12/1999	17	21,8	158,6	$4,82 \times 10^6$	5,0
6	14/12/1999	22	10,7	98,2	$5,84 \times 10^6$	11,9
7	17/1/2000 a 18/1/2000	21	19,6	132,3	$5,18 \times 10^6$	5,8
8	25/1/2000 a 26/1/2000	30	17,3	67,6	$6,48 \times 10^6$	8,2
9	26/1/2000 a 27/1/2000	26	3,8	61,4	$5,62 \times 10^6$	32,1
10	25/6/2000 a 26/6/2000	19	11,7	48,1	$3,05 \times 10^6$	5,7

A tabela 6 mostra que os valores de precipitação total variaram de 3,8mm (evento 9) a 76,2mm (evento 1), sendo que o valor máximo de precipitação gerou a vazão máxima observada, o que não ocorreu com o menor valor de precipitação uma vez que o mínimo valor de vazão de pico ocorreu no evento 10 ( $P_T = 11,7\text{mm}$ ). Os valores de volume escoado variaram de  $3,05 \times 10^6\text{L}$  a  $7,56 \times 10^6\text{L}$ . O coeficiente de escoamento variou de 2,2% a 32,1%, valor este 79% superior ao máximo observado nos eventos de calibração.

#### 5.1.2.1.2.2. Ajuste dos parâmetros

Os parâmetros  $m$ ,  $T_0$ ,  $CHV$  e  $SR_{\max}$  utilizados foram aqueles estabelecidos na etapa de calibração do modelo, apresentados na tabela 3. Assim como no processo de calibração, buscou-se um valor para o parâmetro  $SR_0$  que melhor se ajustasse às condições de cada um



dos eventos. Os valores de  $SR_0$  variaram de 0,0010m a 0,0520m e estão apresentados na tabela 7, a qual também apresenta os valores de eficiência de Nash e Sucliffe (E).

**Tabela 7** – Valores do parâmetro déficit inicial de umidade na zona radicular ( $SR_0$ ) do modelo TOPMODEL e de eficiência de Nash e Sucliffe (E) dos eventos de validação.

<b>Evento</b>	<b><math>SR_0</math> (m)</b>	<b>E</b>
1	0,05200	0,70
2	0,00160	0,76
3	0,01160	-0,45
4	0,01420	0,22
5	0,01200	0,92
6	0,00598	0,63
7	0,00100	0,64
8	0,01250	-0,32
9	0,00300	0,40
10	0,01000	0,11
<b>Valores Médios</b>	<b>0,012388</b>	<b>0,361</b>

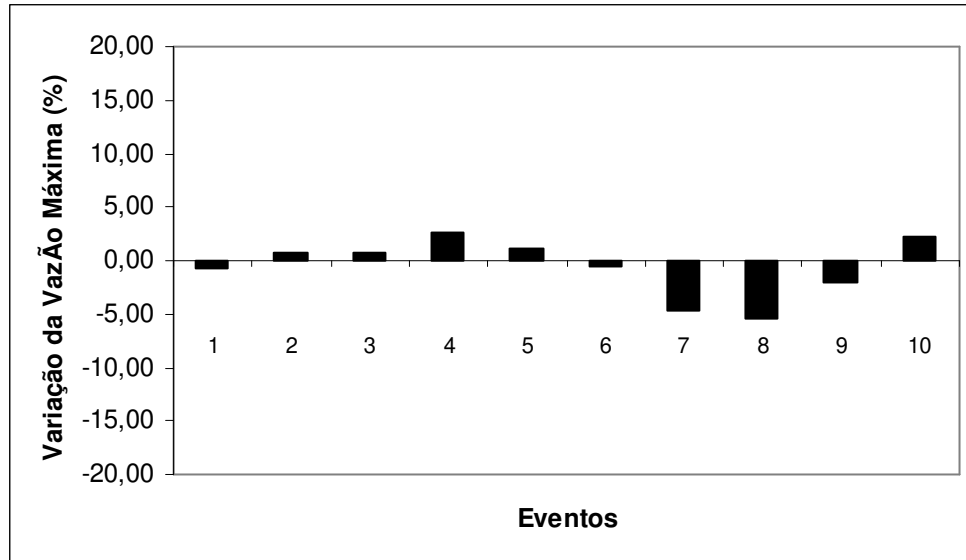
#### **5.1.2.1.2.3. Resultados**

Os principais resultados obtidos nas simulações de validação, utilizando os parâmetros estabelecidos (tabelas 3 e 7) estão apresentados na tabela 8.

**Tabela 8** – Eventos de Validação - Valores de duração dos eventos, precipitação total ( $P_T$ ), vazão máxima observada ( $Q_{\text{maxsim}}$ ), volume escoado observado ( $V_{\text{escsim}}$ ), coeficiente de escoamento observado (Coef. de  $\text{esc}_{\text{sim}}$ ).

Evento	Período	Duração (h)	$P_T$ (mm)	$Q_{\text{maxsim}}$ (L/s)	$V_{\text{escsim}}$ (L)	Coef. de $\text{esc}_{\text{sim}}$ (%)
1	20/2/1999 a 21/2/1999	23	76,2	307,2	$7,00 \times 10^6$	2,2
2	27/2/1999 a 28/2/1999	18	9,1	113,1	$4,47 \times 10^6$	10,7
3	10/12/1999 a 11/12/1999	22	16,5	86,9	$5,95 \times 10^6$	7,7
4	11/12/1999 a 12/12/1999	24	23,4	98,8	$6,81 \times 10^6$	6,2
5	13/12/1999 a 14/12/1999	17	21,8	156,8	$4,62 \times 10^6$	5,0
6	14/12/1999	22	10,7	98,8	$5,99 \times 10^6$	12,2
7	17/1/2000 a 18/1/2000	21	19,6	138,4	$4,73 \times 10^6$	5,8
8	25/1/2000 a 26/1/2000	30	17,3	71,3	$6,37 \times 10^6$	8,2
9	26/1/2000 a 27/1/2000	26	3,8	62,7	$5,62 \times 10^6$	32,1
10	25/6/2000 a 26/6/2000	19	11,7	47,0	$2,98 \times 10^6$	5,7

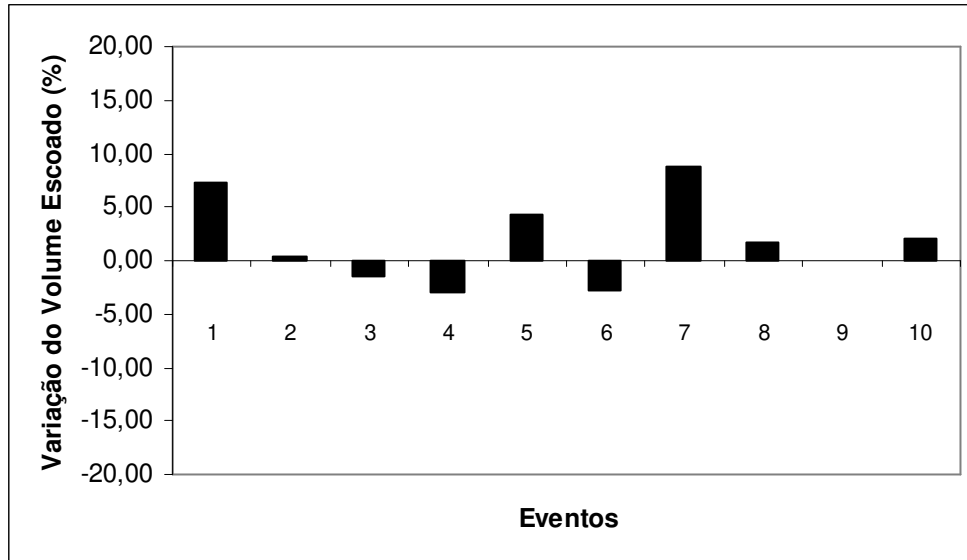
Os valores de vazões máximas simuladas e a variação entre valores observados e simulados, calculada pela expressão:  $([Q_{\text{maxobs}} - \{Q_{\text{maxsim}}\} / Q_{\text{maxsim}}) \times 100$ , são apresentados na tabela 8 e na figura 32, respectivamente. Os valores máximo ( $307,2 \text{L/s}$ ) e mínimo ( $47,0 \text{L/s}$ ) de vazão de pico ocorreram nos eventos 1 e 10, respectivamente. Este resultado confere com os valores obtidos sendo que para o evento 1 o modelo apresentou superestimação e para o evento 10, subestimação. Os volumes escoados semelhantes aos valores observados, sendo o valor máximo ocorrendo no evento 1 e o mínimo, no evento 10, sendo que para ambos os eventos o modelo resultou em subestimação dos valores observados. O coeficiente de escoamento variou de 2,0% a 32,1%, estando na mesma faixa dos valores observados.



**Figura 32** – Variação da vazão máxima observada e simulada para os eventos de validação.

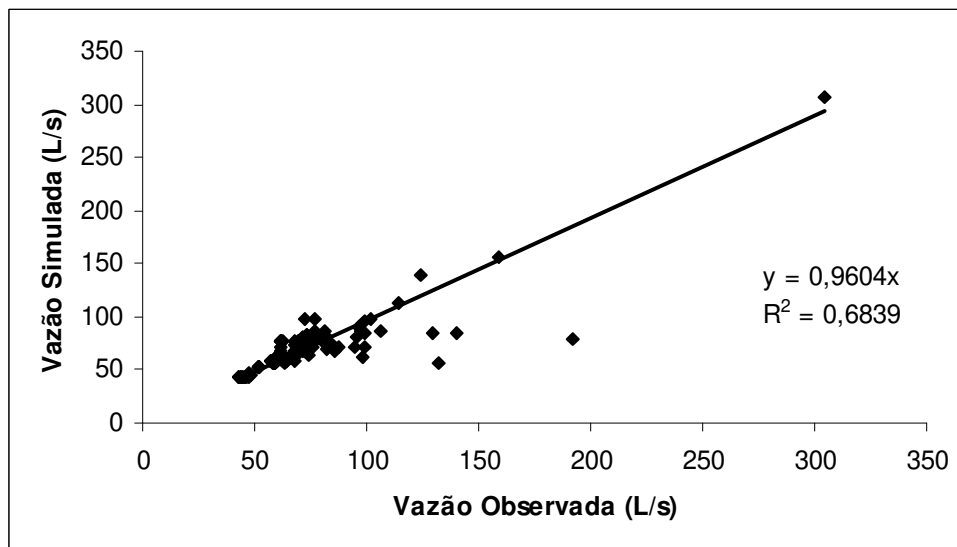
Na figura 32 nota-se que em 50% dos eventos, o valor de vazão máxima simulado foi superior ao observado, sendo o maior valor em módulo igual a 5,5% (evento 8). Para os demais eventos, o modelo mostrou pequena subestimação, constatada pelos baixos valores de variação (0,7% a 2,7%). A variação média entre as vazões máximas observadas e simuladas foi de -0,6% e, em módulo, 2,1%.

A variação dos valores de escoamento observados e simulados, calculada pela expressão  $([V_{escobs} - V_{escsim}] / V_{escobs}) \times 100$ , é apresentada na figura 33, na qual se observa que os eventos 3, 4 e 6 apresentaram valores de volume escoado simulados superiores aos observados, sendo o evento 4 o que apresentou maior diferença (2,9%, em módulo). Ou seja, em 70% dos eventos ocorreu subestimação dos valores de escoamento, sendo que para o evento 9, a diferença foi de 0,05%.

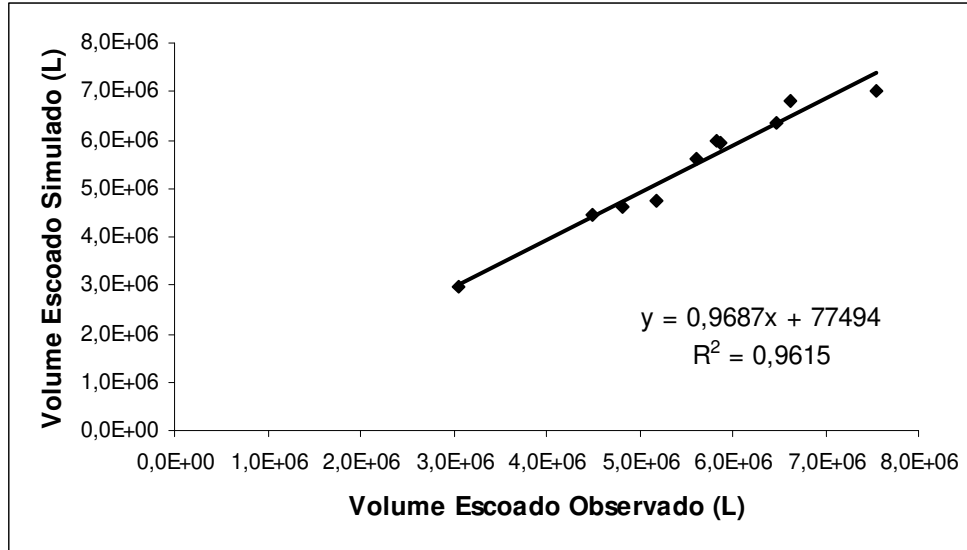


**Figura 33** – Variação do volume escoado observado e simulado para os eventos de validação.

A simulação de validação também foi avaliada pela consistência entre os dados observados e simulados de vazão e de volume escoado, considerando todos os eventos, o que resultou nas figuras 34 e 35.

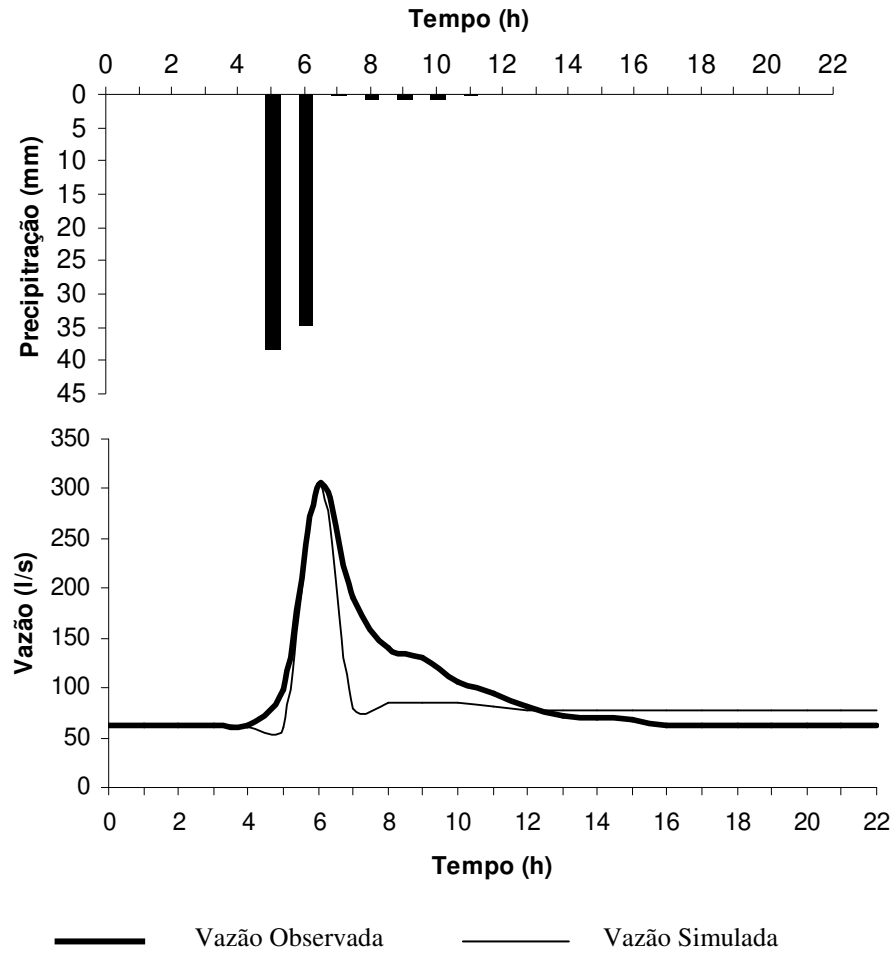


**Figura 34** – Vazão horária observada versus vazão horária simulada para os eventos de validação do TOPMODEL na bacia e modelo de regressão linear entre os valores.

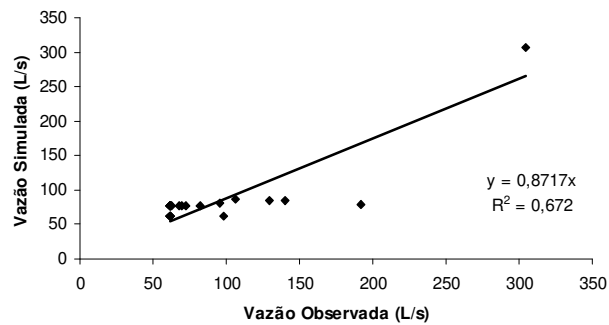


**Figura 35** – Volume escoado observado versus volume escoado simulado para os eventos de validação do TOPMODEL na bacia e modelo de regressão linear entre os valores.

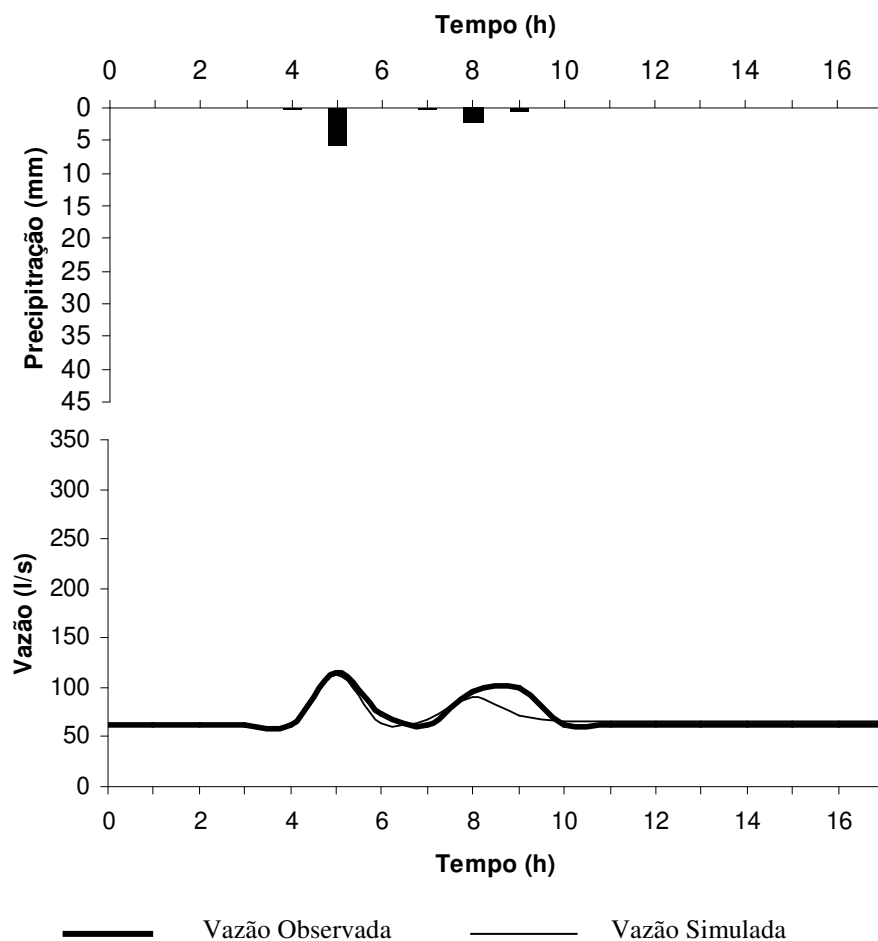
A seguir, cada evento é apresentado isoladamente sendo que, os resultados obtidos são mostrados nas figuras 36, 38, 40, 42, 44, 46, 48, 50, 52 e 54, onde podem ser observados os ietogramas e hidrogramas. A avaliação do resultado da simulação pela relação entre os dados observados e simulados de vazão foi efetuada a partir das figuras 37, 39, 41, 43, 45, 47, 49, 51, 53 e 55. Todos os ietogramas e hidrogramas são mostrados em uma única escala para efeitos de comparação. No capítulo apêndices (item A.2), os mesmos são apresentados em escala diferenciada permitindo uma melhor visualização (figuras 137 a 146).



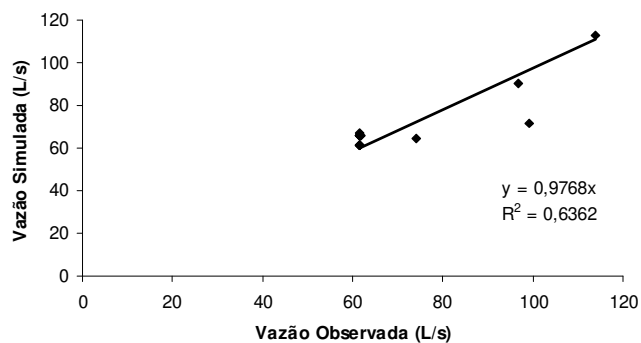
**Figura 36** - Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 1 (20/2/1999 a 21/2/1999) utilizado no processo de validação na aplicação do modelo TOPMODEL.



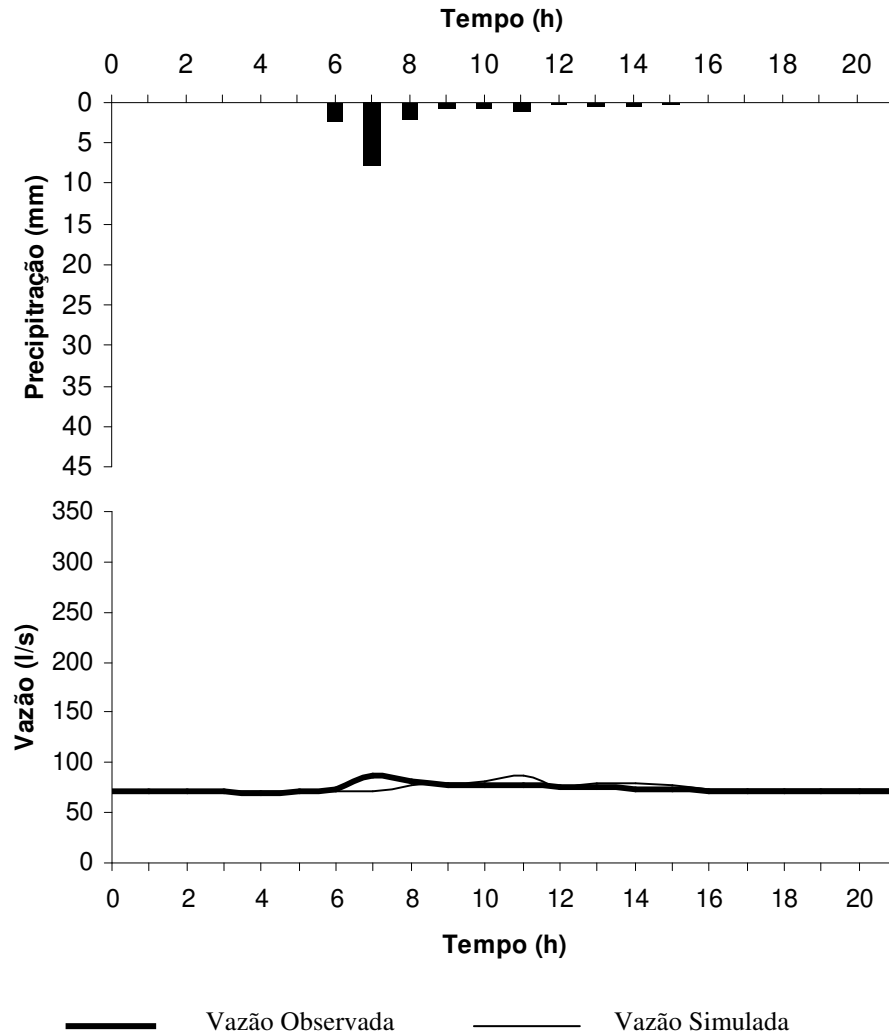
**Figura 37** – Vazão horária observada versus vazão horária simulada para o evento 1 de validação do TOPMODEL na bacia e respectivo modelo de regressão linear entre os valores.



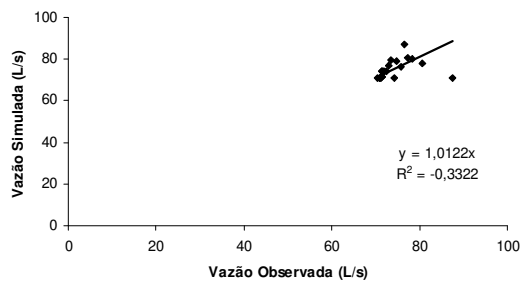
**Figura 38** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 2 (27/2/1999 a 28/2/1999) utilizado no processo de validação na aplicação do modelo TOPMODEL.



**Figura 39** – Vazão horária observada versus vazão horária simulada para o evento 2 de validação do TOPMODEL na bacia e respectivo modelo de regressão linear entre os valores.

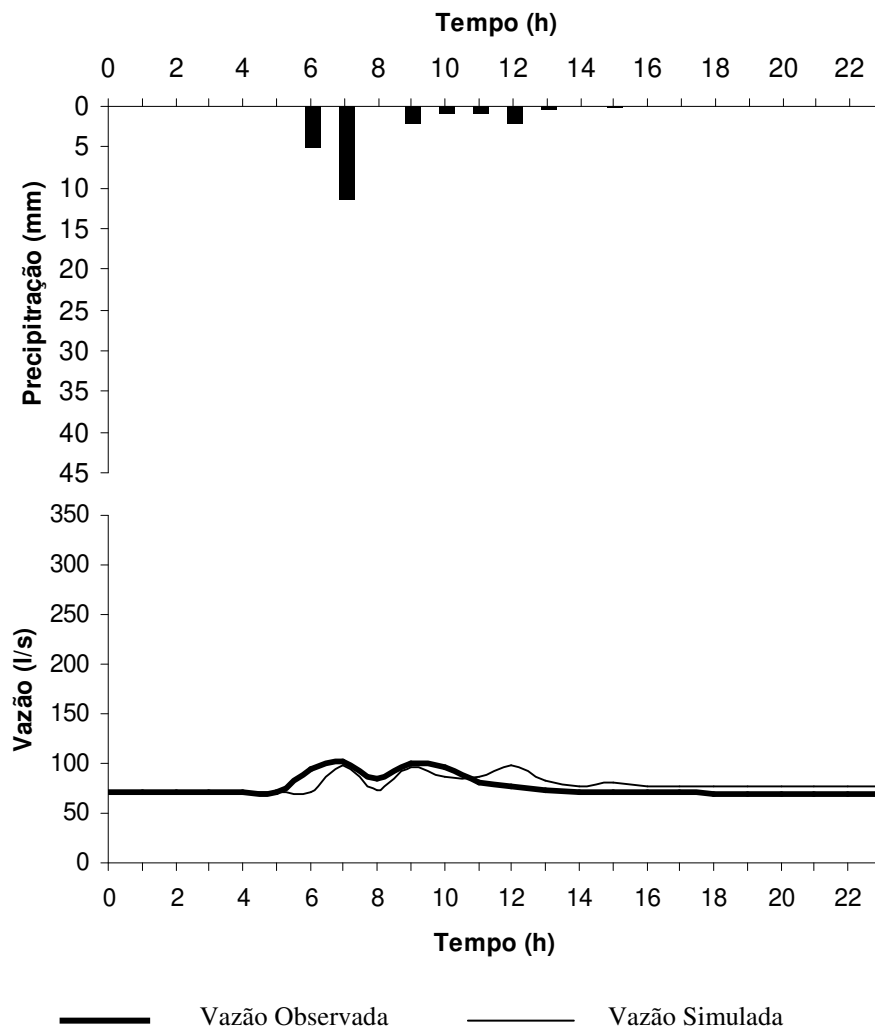


**Figura 40** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 3 (10/12/1999 a 11/12/1999) utilizado no processo de validação na aplicação do modelo TOPMODEL.

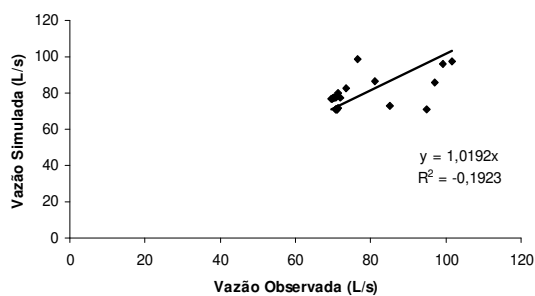


**Figura 41** – Vazão horária observada versus vazão horária simulada para o evento 3 de validação do TOPMODEL na bacia e respectivo modelo de regressão linear entre os valores.

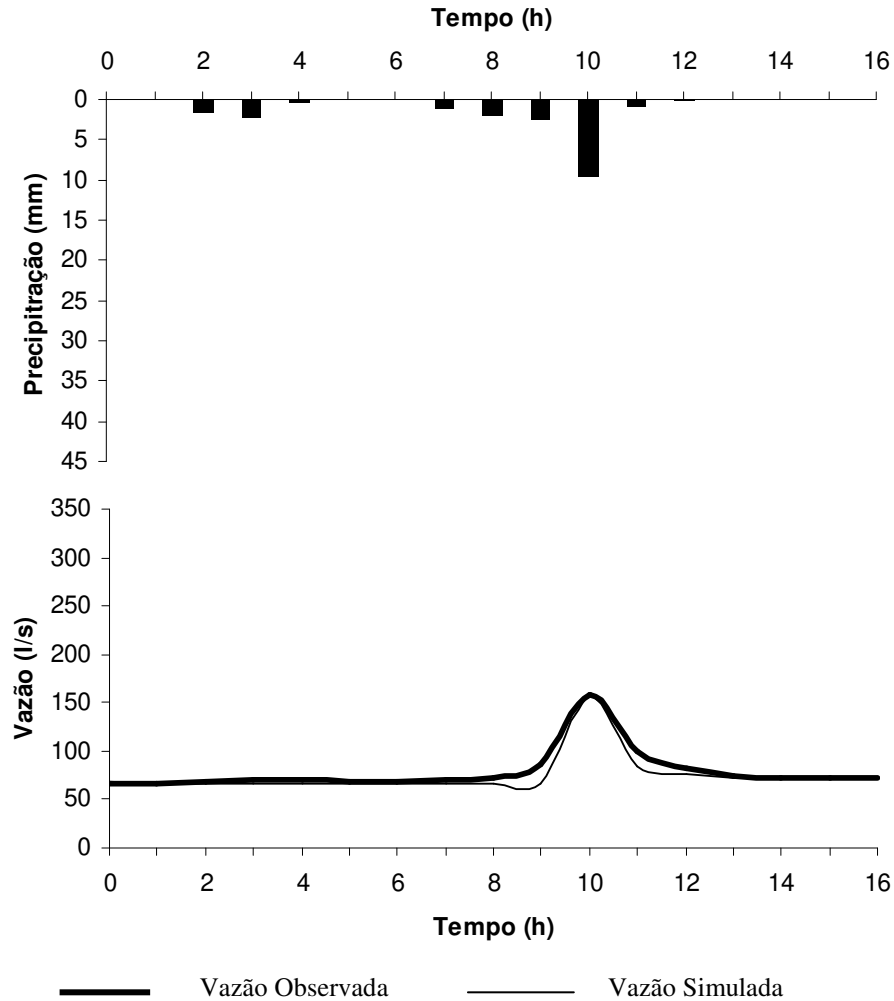




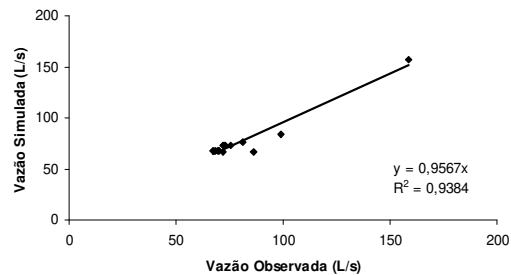
**Figura 42** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 4 (11/12/1999 a 12/12/1999) utilizado no processo de validação na aplicação do modelo TOPMODEL.



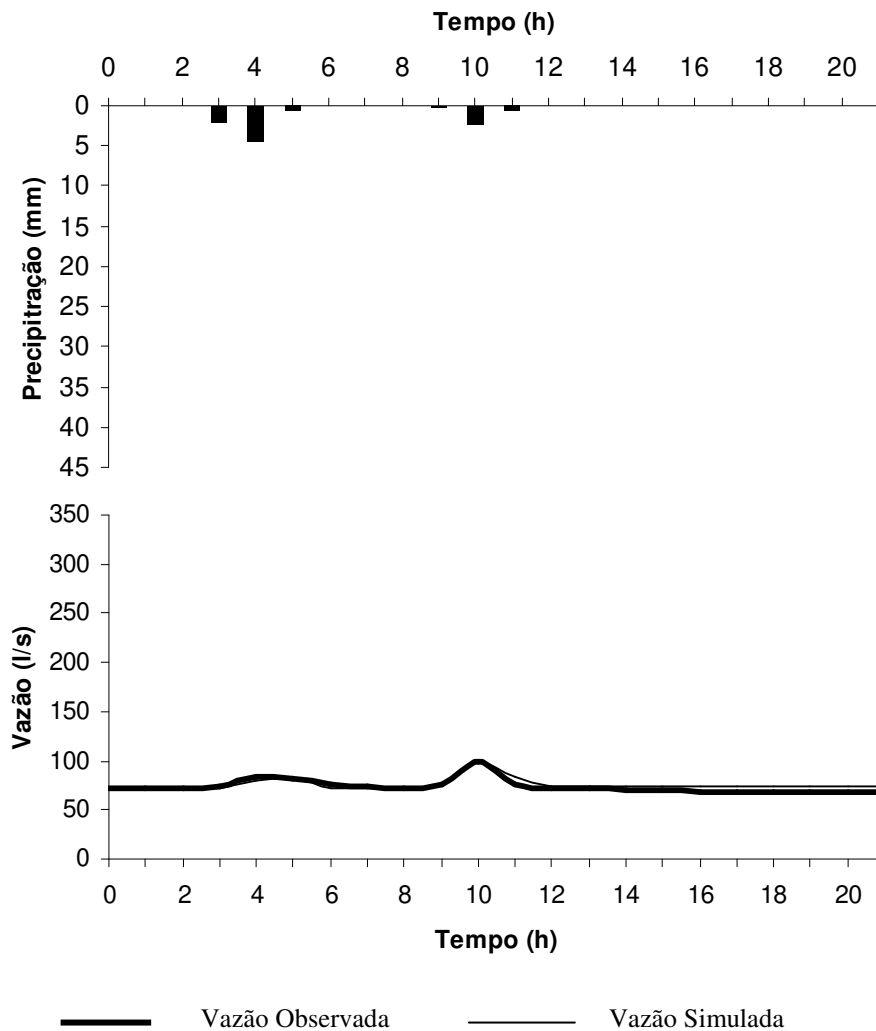
**Figura 43** – Vazão horária observada versus vazão horária simulada para o evento 4 de validação do TOPMODEL na bacia e respectivo modelo de regressão linear entre os valores.



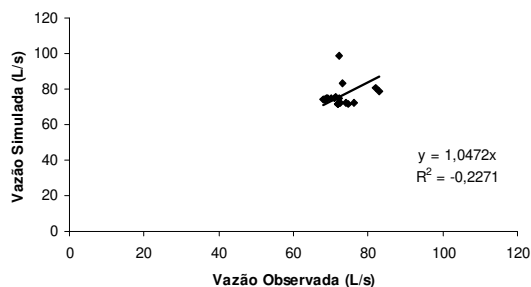
**Figura 44** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 5 (13/12/1999 a 14/12/1999) utilizado no processo de validação na aplicação do modelo TOPMODEL.



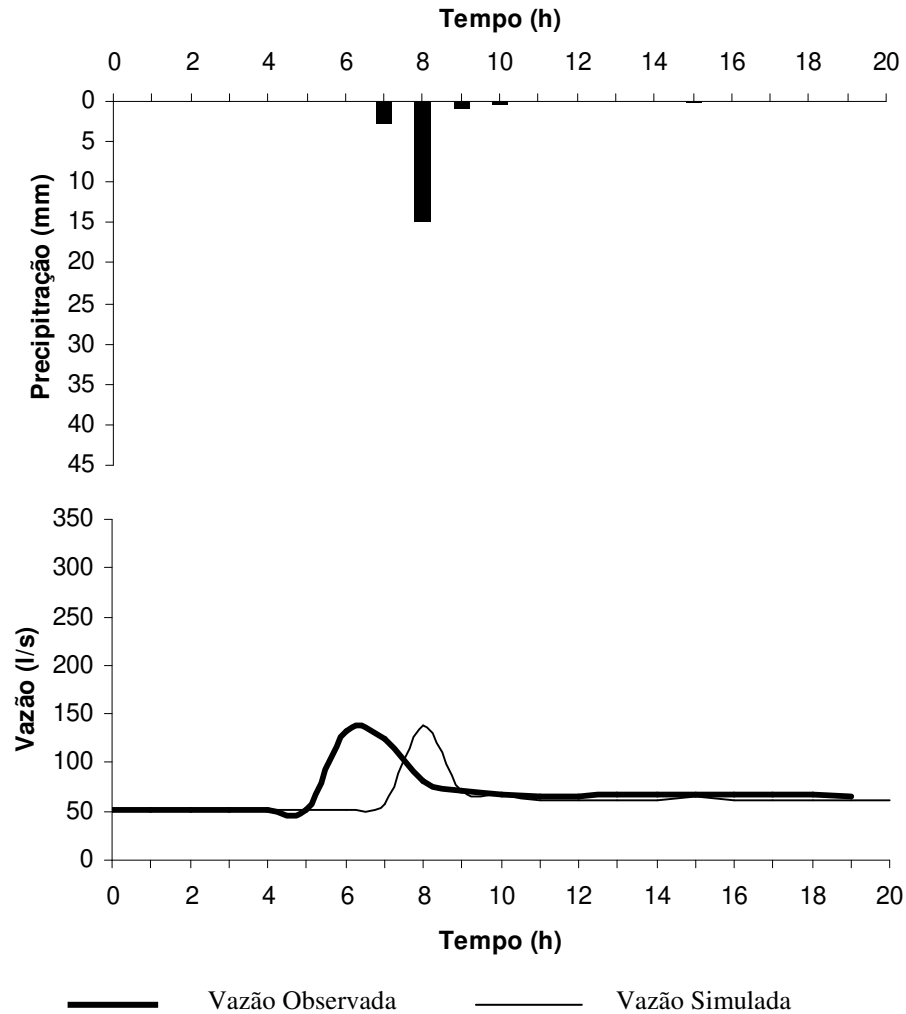
**Figura 45** – Vazão horária observada versus vazão horária simulada para o evento 5 de validação do TOPMODEL na bacia e respectivo modelo de regressão linear entre os valores.



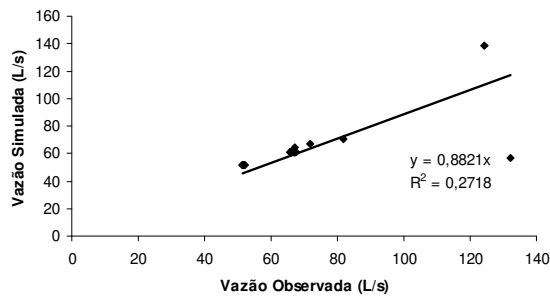
**Figura 46** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 6 (14/12/1999) utilizado no processo de validação na aplicação do modelo TOPMODEL.



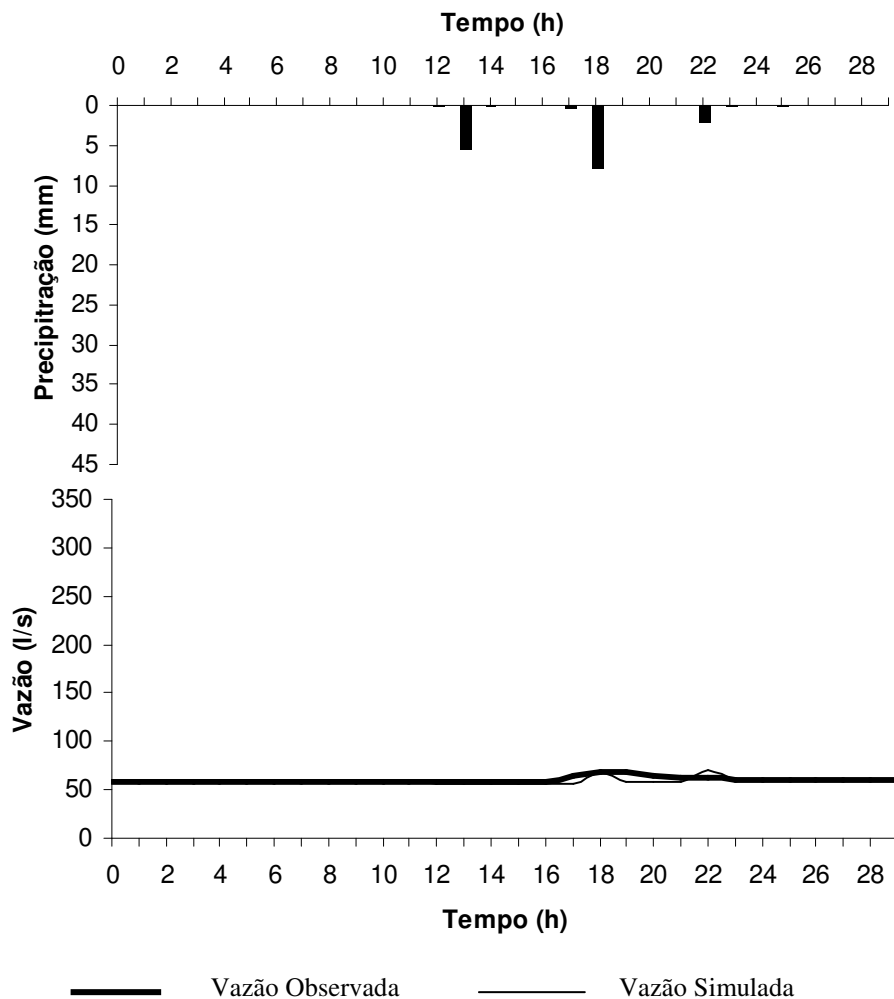
**Figura 47** – Vazão horária observada versus vazão horária simulada para o evento 6 de validação do TOPMODEL na bacia e respectivo modelo de regressão linear entre os valores.



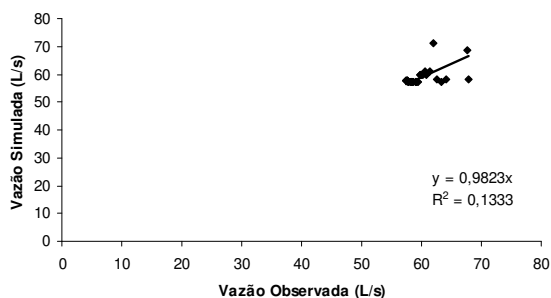
**Figura 48** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 7 (17/1/2000 a 18/1/2000) utilizado no processo de validação na aplicação do modelo TOPMODEL.



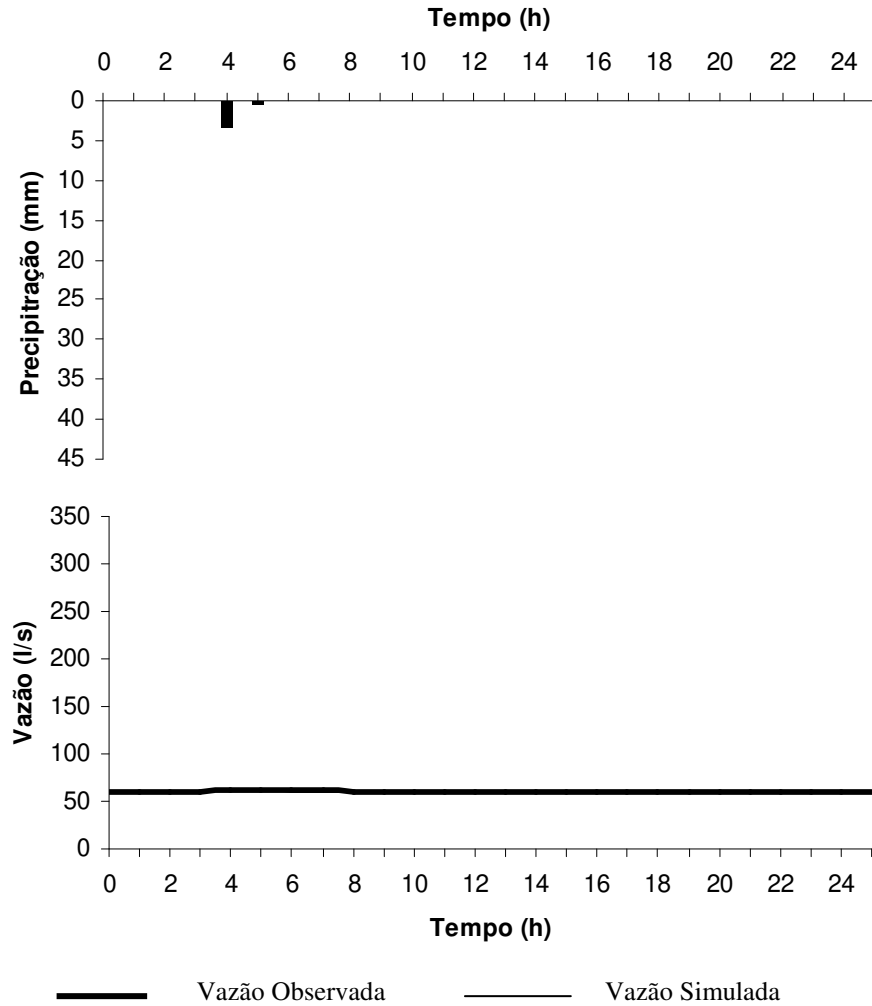
**Figura 49** – Vazão horária observada versus vazão horária simulada para o evento 7 de validação do TOPMODEL na bacia e respectivo modelo de regressão linear entre os valores.



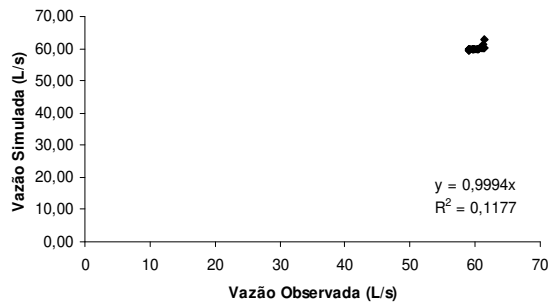
**Figura 50** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 8 (25/1/2000 a 26/1/2000) utilizado no processo de validação na aplicação do modelo TOPMODEL.



**Figura 51**– Vazão horária observada versus vazão horária simulada para o evento 8 de validação do TOPMODEL na bacia e respectivo modelo de regressão linear entre os valores.



**Figura 52** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 9 (26/1/2000 a 27/1/2000) utilizado no processo de validação na aplicação do modelo TOPMODEL.



**Figura 53** – Vazão horária observada versus vazão horária simulada para o evento 9 de validação do TOPMODEL na bacia e respectivo modelo de regressão linear entre os valores.

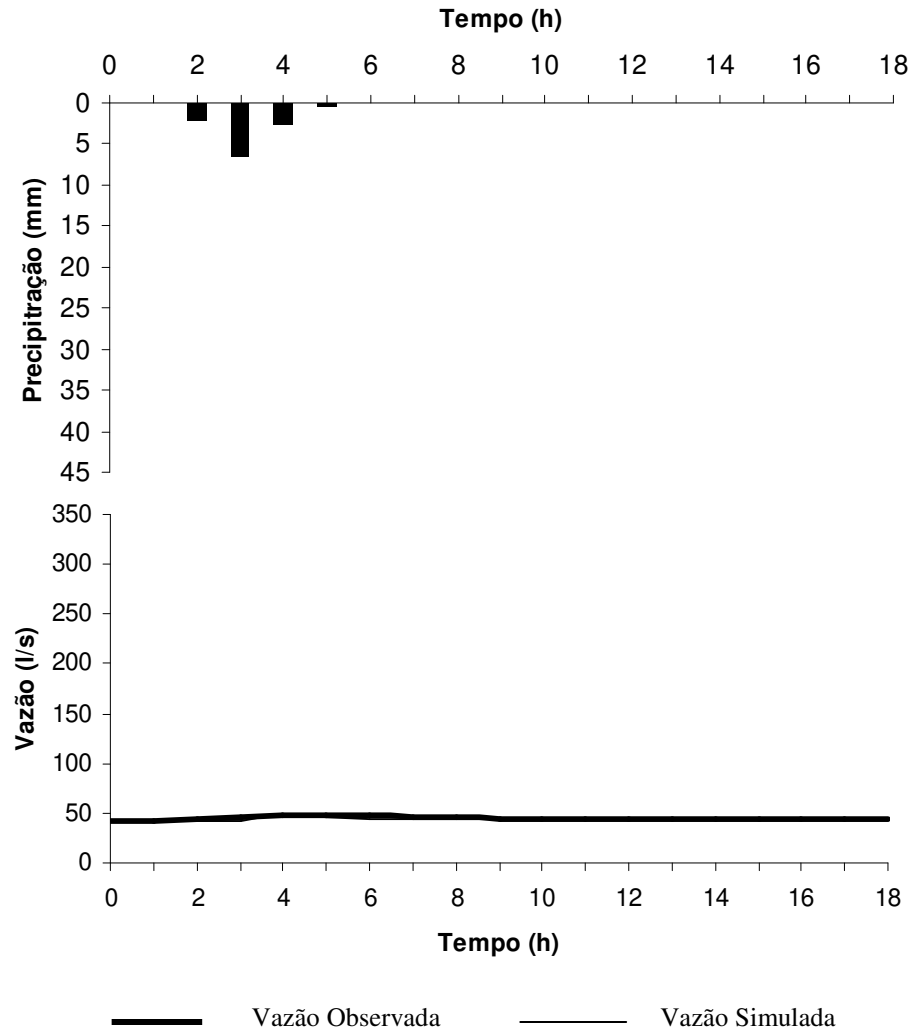


Figura 54 – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 10 (25/6/2000 a 26/6/2000) utilizado no processo de validação na aplicação do modelo TOPMODEL.

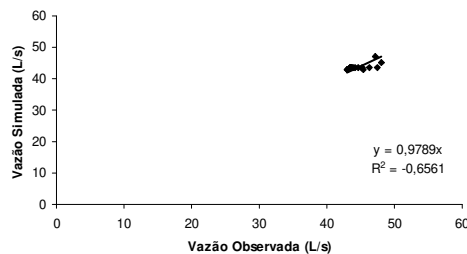


Figura 55 – Vazão horária observada versus vazão horária simulada para o evento 10 de validação do TOPMODEL na bacia e respectivo modelo de regressão linear entre os valores.

## 5.1.2.2. Aplicação do modelo TOPMODEL em conjunto a um modelo de interceptação vegetal

### 5.1.2.2.1. Modelo de Interceptação Vegetal

#### 5.1.2.2.1.1. Índice de Área Foliar

A estimativa do IAF descrita no item 4.4.2.2.1 resultou nos valores apresentados na tabela 9.

**Tabela 9** – Valores médios do IAF semanal para a bacia, tendo como início o mês de maio, para um período de 12 meses.

Dias acumulados*	IAF médio	Dias acumulados*	IAF médio
7	2,64	189	1,11
14	2,69	196	0,94
21	2,73	203	0,79
28	2,77	210	0,63
35	2,79	217	0,49
42	2,81	224	0,35
49	2,82	231	0,23
56	2,83	238	0,30
63	2,84	245	0,38
70	2,85	252	0,47
77	2,85	259	0,58
84	2,85	266	0,71
91	2,85	273	0,84
98	2,86	280	0,98
105	2,86	287	1,13
112	2,86	294	1,28
119	2,86	301	1,44
126	2,68	308	1,59
133	2,50	315	1,74
140	2,33	322	1,89
147	2,15	329	2,03
154	1,97	336	2,17
161	1,80	343	2,29
168	1,62	350	2,40
175	1,45	357	2,49
182	1,28	364	2,57

\* A partir de 1<sup>o</sup> de maio.



#### 5.1.2.2.1.2. Escoamento pelo colmo

De posse dos valores de precipitação total e escoamento pelo colmo medidos no experimento de VIEIRA (1982), ajustou-se uma equação que relaciona o escoamento pelo colmo à precipitação total medida, dada por:

$$y = 1,5467\text{Ln}(x) + 0,1869 \quad (28)$$

em que  $y$  representa o escoamento pelo colmo (mm) e  $x$ , a precipitação total (mm).

#### 5.1.2.2.1.3. Eventos de calibração

##### 5.1.2.2.1.3.1. Interceptação Vegetal

Considerando os eventos do item 5.1.2.1.1.1, foi aplicado o modelo de interceptação vegetal descrito no item 4.4.2.2.1.1, adotando-se os valores de IAF da tabela 9. Os valores dos obtidos com a aplicação do modelo de CASTILHO (2000) são apresentados na tabela 10.

**Tabela 10** - Valores de precipitação total ( $P_T$ ); de IAF; dos coeficientes angular e linear, da lâmina de água no solo ( $P_L$ ), e da precipitação interceptada ( $P_P$ ) resultantes da aplicação do modelo de CASTILHO (2000) para os eventos de calibração.

Evento	Dias Corridos	$P_T$ (mm)	IAF médio	Coefficiente angular (a)	Coefficiente linear (b)	$P_L$ (mm)	$P_P$ (mm)
1	16 – 17	23,9	2,73	0,54	0,10	9,0	3,3
2	44 – 45	16,3	2,82	0,54	0,10	13,0	14,9
3	64 – 65	22,4	2,85	0,54	0,10	12,1	10,3
4	67 -68	25,4	2,85	0,54	0,10	13,8	11,6
5	69	7,9	2,85	0,54	0,1	4,3	3,6

##### 5.1.2.2.1.3.2. Escoamento pelo colmo

Os valores de escoamento pelo colmo foram calculados fazendo uso da equação 28 e os resultados para os eventos de calibração constam na tabela 11.

**Tabela 11** – Valores de escoamento pelo colmo (EC) resultantes da aplicação do modelo de escoamento pelo colmo para os eventos de calibração.

Evento	EC (mm)
1	4,5
2	5,1
3	5,0
4	5,2
5	3,4

Os valores de precipitação que chega ao solo ( $P_s$ ), usados nas simulações de calibração e também os do coeficiente  $\phi$  constam na tabela 12.

**Tabela 12** – Valores de PS e  $\phi$  determinados para os eventos de calibração do modelo TOPMODEL em conjunto com um modelo de interceptação vegetal.

Evento	PS (mm)	$\phi$
1	13,5	0,76
2	18,1	0,83
3	17,1	0,77
4	19,0	0,75
5	7,7	0,98

#### **5.1.2.2.1.3.4. Ajustes dos parâmetros**

##### **5.1.2.2.1.3.4.1. Ajustes dos parâmetros considerando a hipótese H1 de distribuição da precipitação interceptada**

O ajuste dos parâmetros foi realizado como descrito no item 4.4.2.2.2.2. Com exceção do valor do parâmetro transmissividade lateral saturada, os demais não sofreram alteração. A tabela 13 apresenta os valores dos parâmetros estabelecidos no processo de calibração obtidos no uso do modelo TOPOMODEL em conjunto ao modelo de interceptação vegetal obtidos no processo de calibração.

**Tabela 13** - Parâmetros do modelo TOPMODEL aplicado em conjunto ao modelo de interceptação vegetal obtidos no processo de calibração.

Parâmetro	Valor adotado	Unidade
Armazenamento exponencial (m)	0,1	m
Transmissividade lateral saturada ( $T_0$ )	2,4596	$m^2h^{-1}$
Velocidade de Propagação do canal (CHV)	2000	$mh^{-1}$
Capacidade máxima de armazenamento na zona radicular ( $SR_{max}$ )	0,2	m

Para o parâmetro déficit inicial de umidade na zona radicular ( $SR_0$ ) buscou-se um valor que melhor se ajustasse às condições de cada um dos eventos. A tabela 14 apresenta os valores do déficit inicial de umidade na zona radicular ( $SR_0$ ) e os valores de eficiência de Nash e Sucliffe (E) dos eventos de calibração.

**Tabela 14** – Valores do parâmetro déficit inicial de umidade na zona radicular ( $SR_0$ ) do modelo TOPMODEL e de eficiência de Nash e Sucliffe (E) dos eventos de calibração considerando a hipótese H1 de distribuição da precipitação interceptada.

Evento	$SR_0$ (m)	E (%)
1	0,00100	97
2	0,00800	77
3	0,00900	74
4	0,00700	96
5	0,00629	35
<b>Valores médios</b>	<b>0,00626</b>	<b>75,8</b>

#### 5.1.2.2.1.3.4.2. Ajustes dos parâmetros considerando a hipótese H2 de distribuição da precipitação interceptada

Os valores dos parâmetros fator de forma, transmissividade lateral saturada, velocidade de propagação do canal e capacidade máxima de armazenamento na zona radicular foram os mesmos estabelecidos para hipótese H1.

A tabela 15 apresenta os valores do déficit inicial de umidade na zona radicular ( $SR_0$ ) e os valores de eficiência de Nash e Sucliffe (E) dos eventos de calibração considerando a hipótese H2 de distribuição da precipitação interceptada.

**Tabela 15** – Valores do parâmetro déficit inicial de umidade na zona radicular ( $SR_0$ ) do modelo TOPMODEL e de eficiência de Nash e Sucliffe (E) dos eventos de calibração considerando a hipótese H2.

<b>Evento</b>	<b><math>SR_0</math> (m)</b>	<b>E (%)</b>
1	0,0010	97
2	0,0076	78
3	0,0001	92
4	0,0070	96
5	0,0062	33
<b>Valores médios</b>	<b>0,00438</b>	<b>79,2</b>

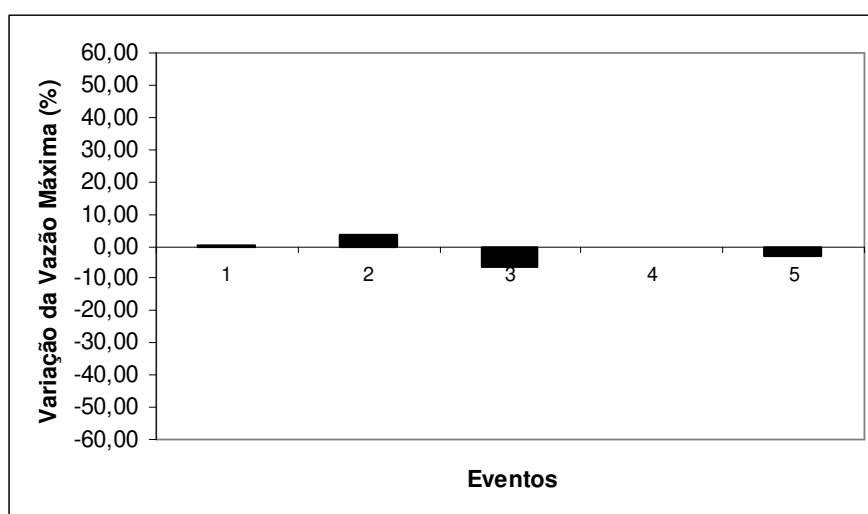
#### **5.1.2.2.1.3.5. Resultados**

##### **5.1.2.2.1.3.5.1. Resultados considerando a hipótese H1 de distribuição da precipitação interceptada**

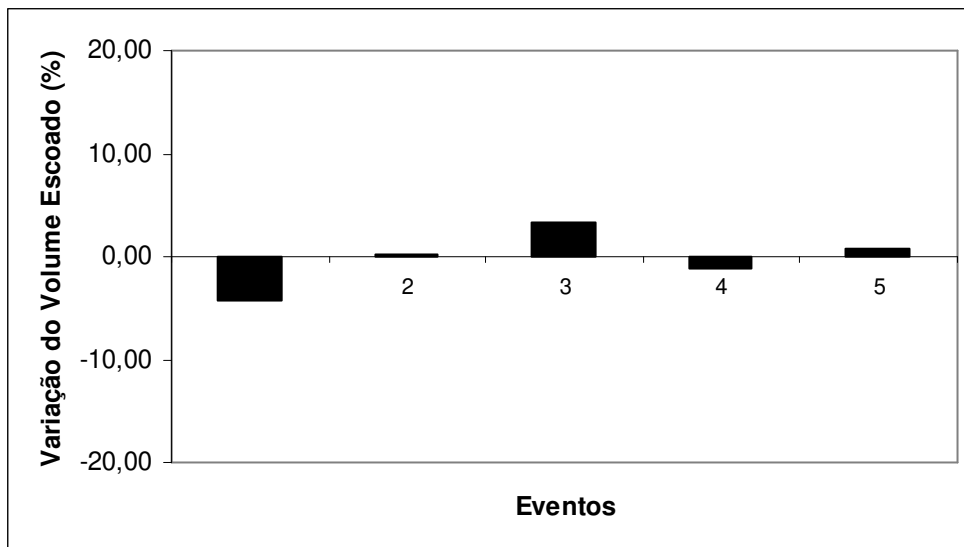
A tabela 16 apresenta de forma resumida os resultados principais das simulações de calibração utilizando o modelo TOPMODEL em conjunto a um modelo de interceptação vegetal, considerando a hipótese H1 de distribuição da precipitação interceptada. As figuras 56, 57, 58 e 59 também ilustram estes resultados.

**Tabela 16**– Eventos de Calibração - Valores de duração dos eventos, precipitação que chega ao solo ( $P_s$ ), vazão máxima simulada ( $Q_{maxsim}$ ), volume escoado simulado ( $V_{escsim}$ ), coeficiente de escoamento simulado (Coef. de  $esc_{sim}$ ), considerando a hipótese H1 de distribuição da precipitação interceptada.

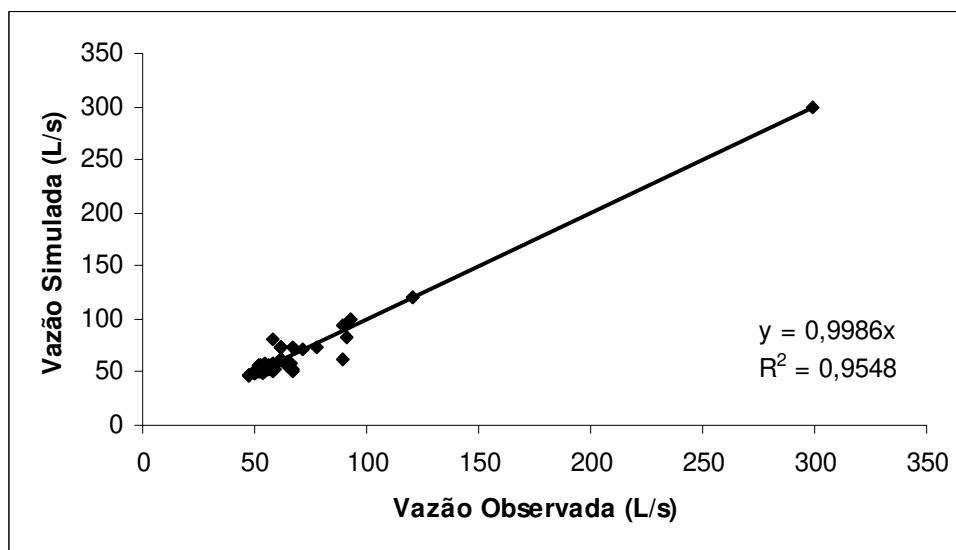
Evento	Período	Duração (h)	$P_s$ (mm)	$Q_{maxsim}$ (L/s)	$V_{escsim}$ (L)	Coef. de $esc_{sim}$ (%)
1	13/2/1999 a 14/2/1999	13	18,1	298,6	$4,13 \times 10^6$	5,0
2	16/1/2000 a 17/1/2000	26	13,5	82,0	$5,21 \times 10^6$	8,4
3	05/3/2001 a 06/3/2001	15	17,1	94,9	$2,92 \times 10^6$	3,7
4	08/3/2001 a 09/3/2001	16	18,9	121,0	$3,61 \times 10^6$	4,2
5	10/3/2001	13	7,7	58,6	$2,40 \times 10^6$	6,8



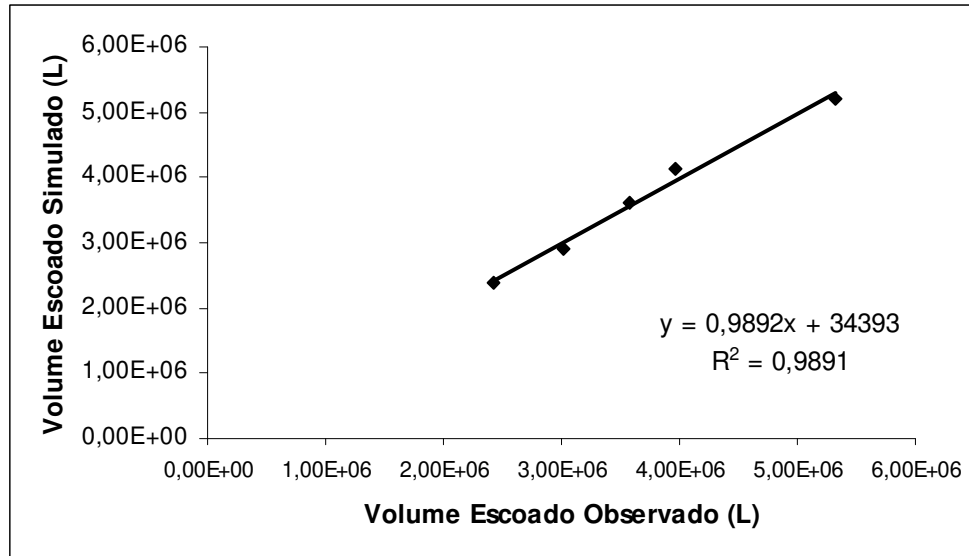
**Figura 56** – Variação da vazão máxima observada e simulada para os eventos de calibração considerando a hipótese H1



**Figura 57** – Variação do volume escoado observado e simulado para os eventos de calibração considerando a hipótese H1.

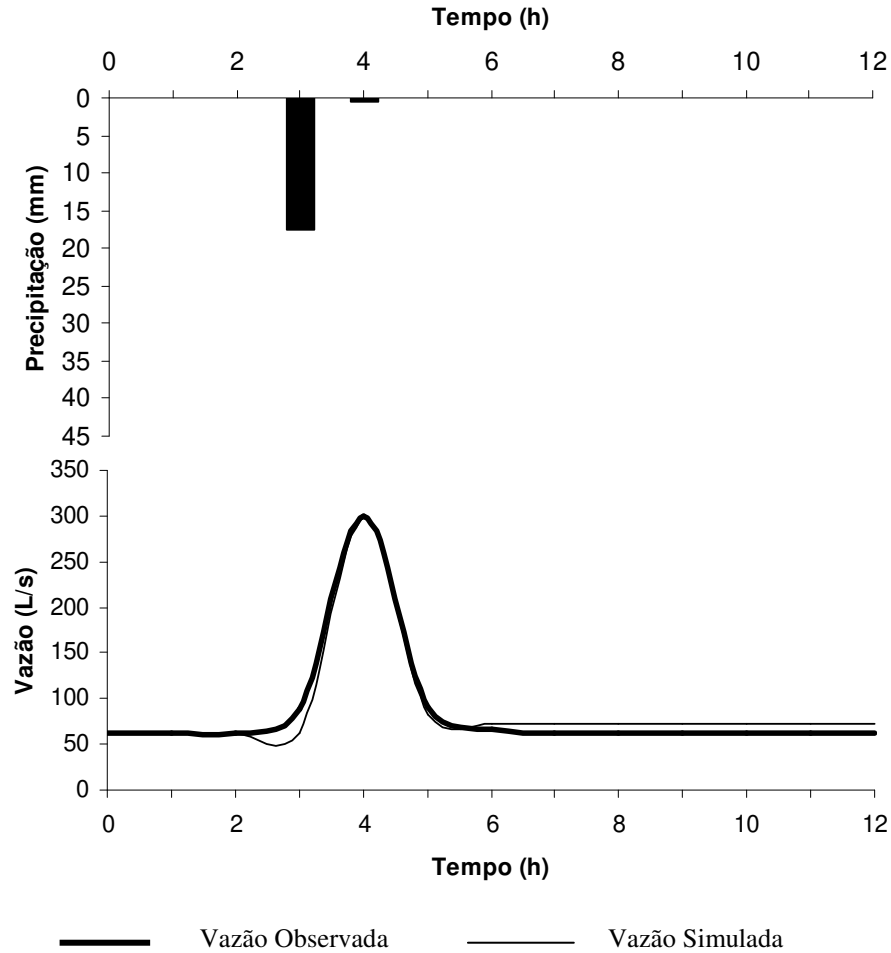


**Figura 58** – Vazão horária observada versus vazão horária simulada para os eventos de calibração, considerando a hipótese H1, e modelo de regressão linear entre os valores.

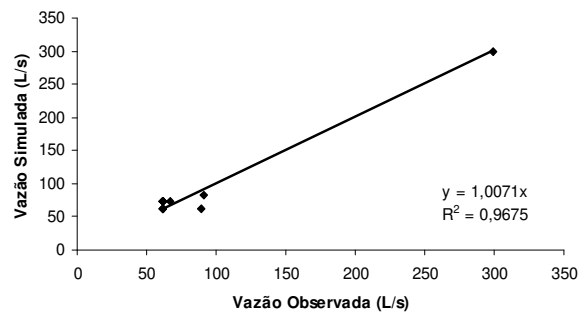


**Figura 59** – Volume escoado observado versus volume escoado simulado para os eventos de calibração, considerando a hipótese H1 e modelo de regressão linear.

A seguir, cada evento é analisado isoladamente sendo que, os resultados obtidos são mostrados nas figuras 60, 62, 64, 66 e 68, nas quais podem ser observados os ietogramas e hidrogramas. A avaliação do resultado da simulação pela relação entre os dados observados e simulados de vazão foi efetuada a partir das figuras 61, 63, 65, 67 e 69. Todos os ietogramas e hidrogramas são mostrados em uma única escala para efeitos de comparação. No capítulo apêndices (seção B.1.1), os mesmos são apresentados em escala diferenciada permitindo uma melhor visualização (figuras 147 a 151).

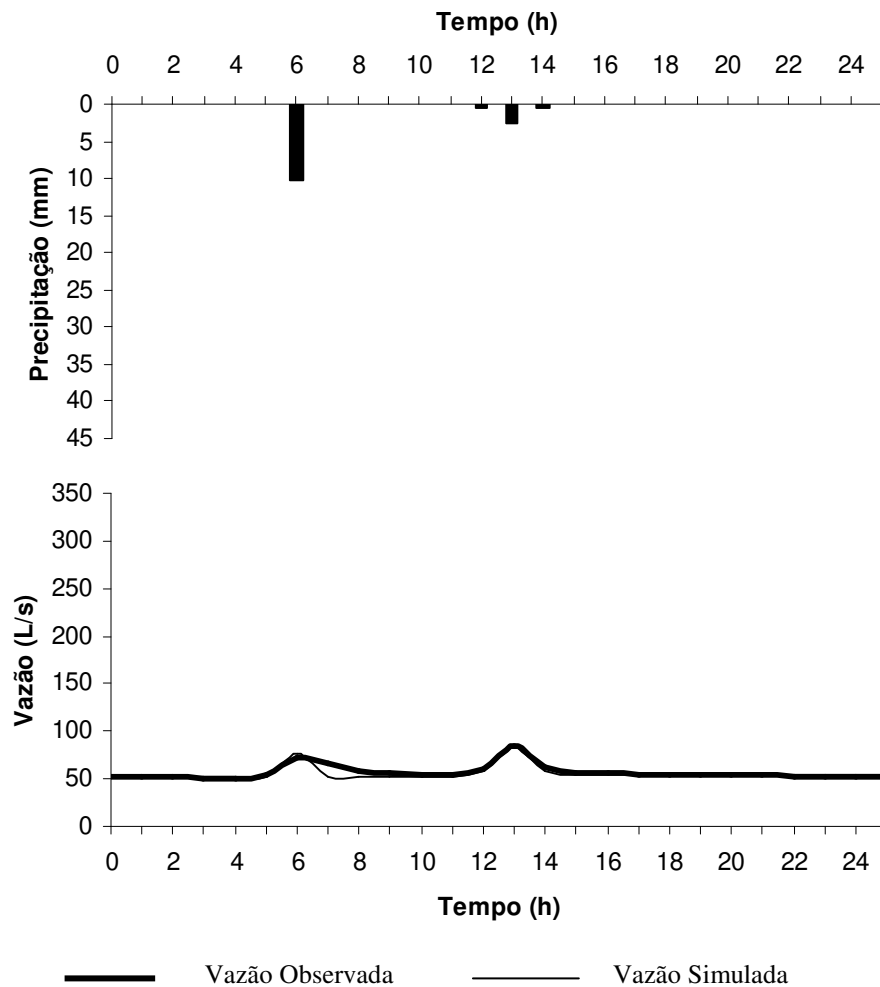


**Figura 60** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 1 (13/2/1999 a 14/2/1999) utilizado no processo de calibração na aplicação do modelo TOPMODEL considerando a hipótese H1.

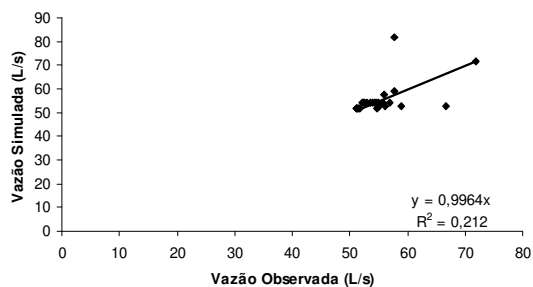


**Figura 61** - Vazão horária observada versus vazão horária simulada para o evento 1 de calibração do TOPMODEL considerando a hipótese H1 e respectivo modelo de regressão linear entre os valores.

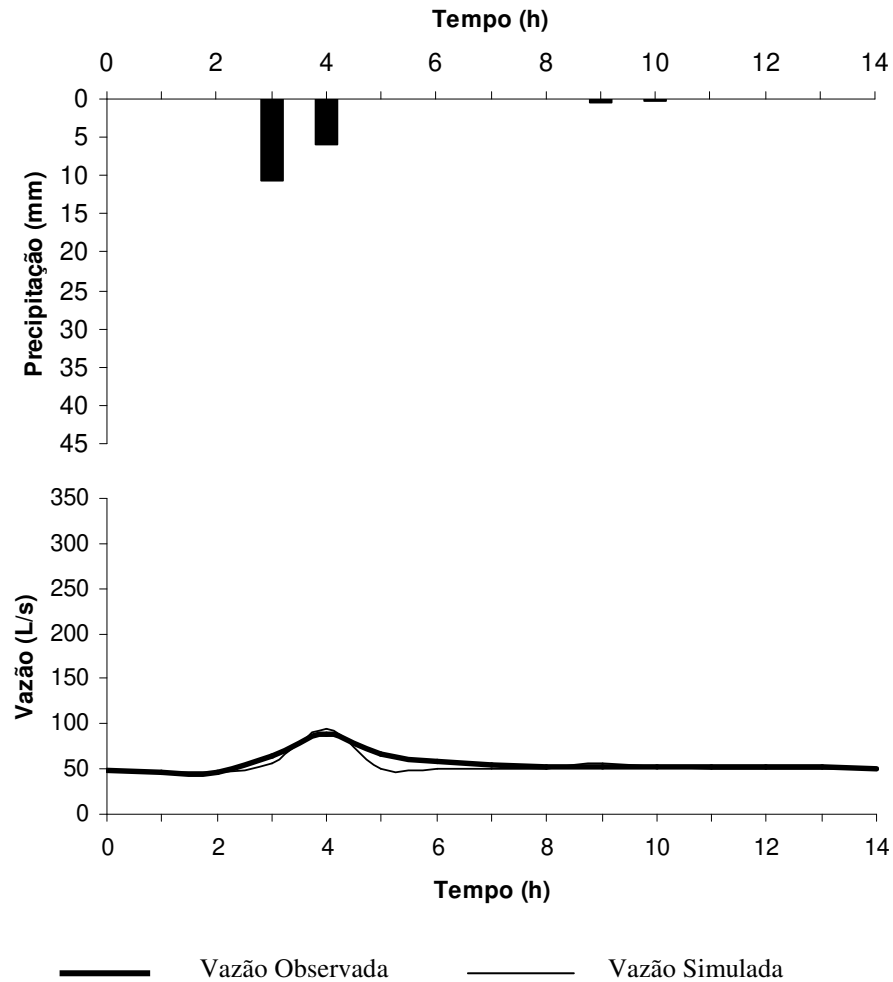




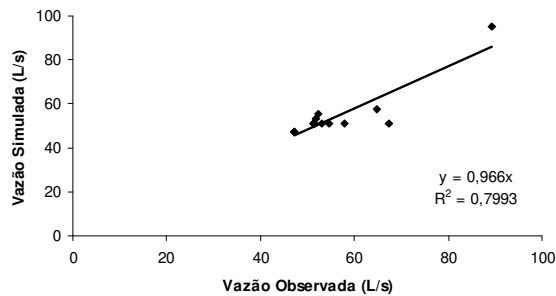
**Figura 62** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 2 (16/1/2000 a 17/12/2000) utilizado no processo de calibração na aplicação do modelo TOPMODEL considerando a hipótese H1.



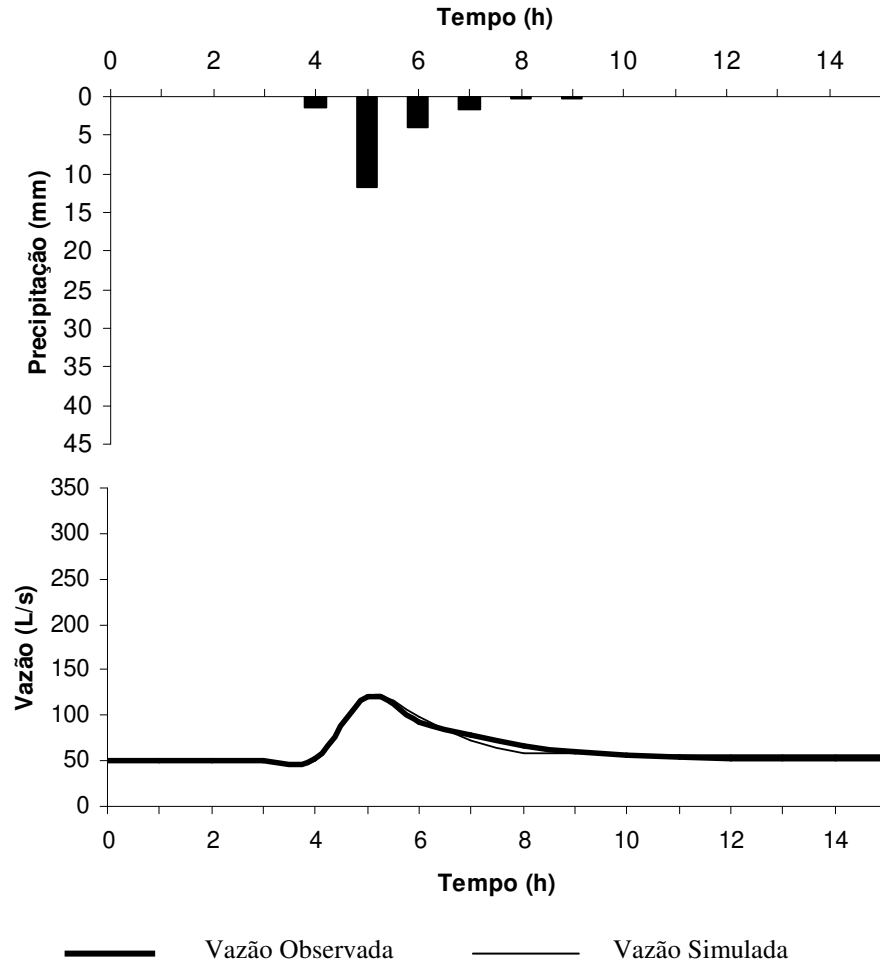
**Figura 63** - Vazão horária observada versus vazão horária simulada para o evento 2 de calibração do TOPMODEL considerando a hipótese H1 e respectivo modelo de regressão linear entre os valores.



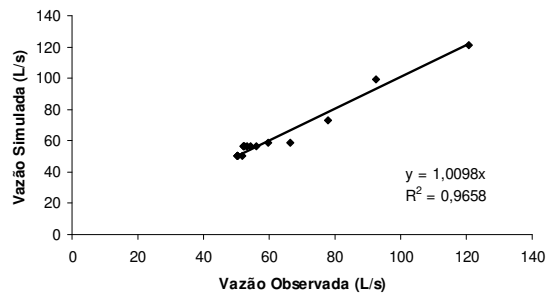
**Figura 64** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 3 (05/3/2001 a 06/3/2001) utilizado no processo de calibração na aplicação do modelo TOPMODEL considerando a hipótese H1.



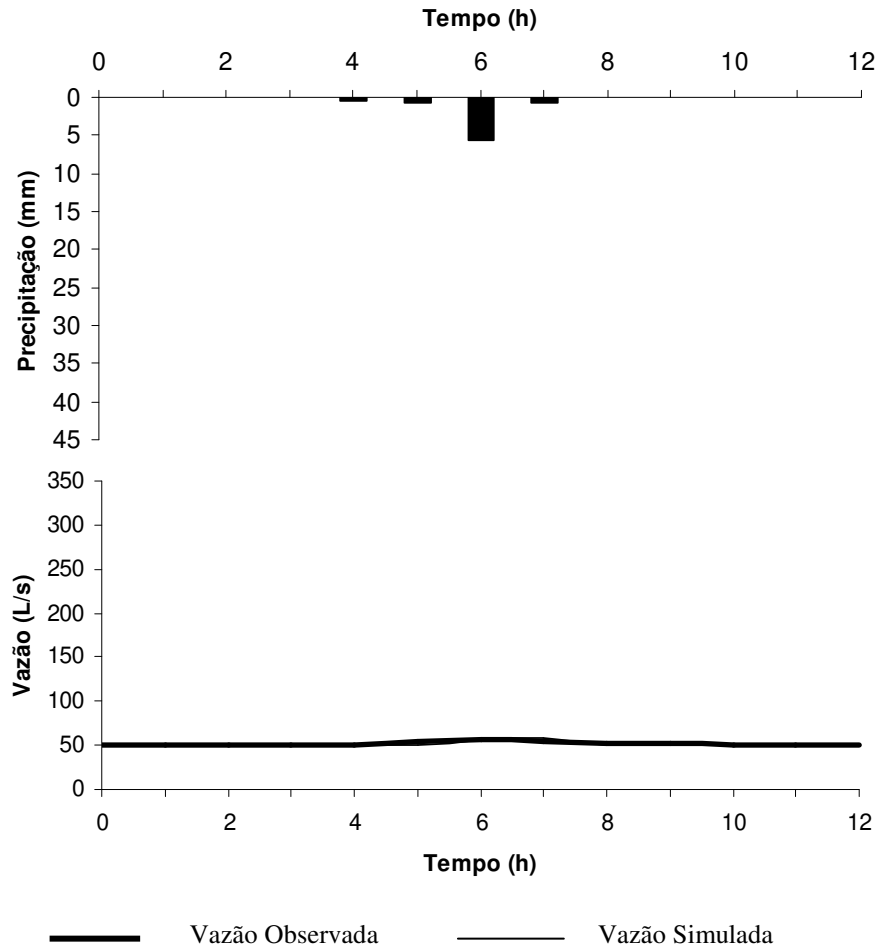
**Figura 65** - Vazão horária observada versus vazão horária simulada para o evento 3 de calibração do TOPMODEL considerando a hipótese H1 e respectivo modelo de regressão linear entre os valores.



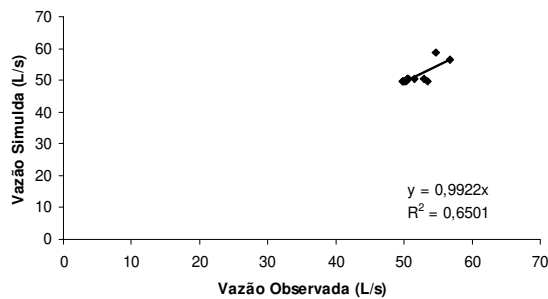
**Figura 66** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 4 (08/3/2001 a 09/3/2001) utilizado no processo de calibração na aplicação do modelo TOPMODEL considerando a hipótese H1.



**Figura 67** - Vazão horária observada versus vazão horária simulada para o evento 4 de calibração do TOPMODEL considerando a hipótese H1 e respectivo modelo de regressão linear.



**Figura 68** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 5 (10/3/20001) utilizado no processo de calibração na aplicação do modelo TOPMODEL considerando a hipótese H1.



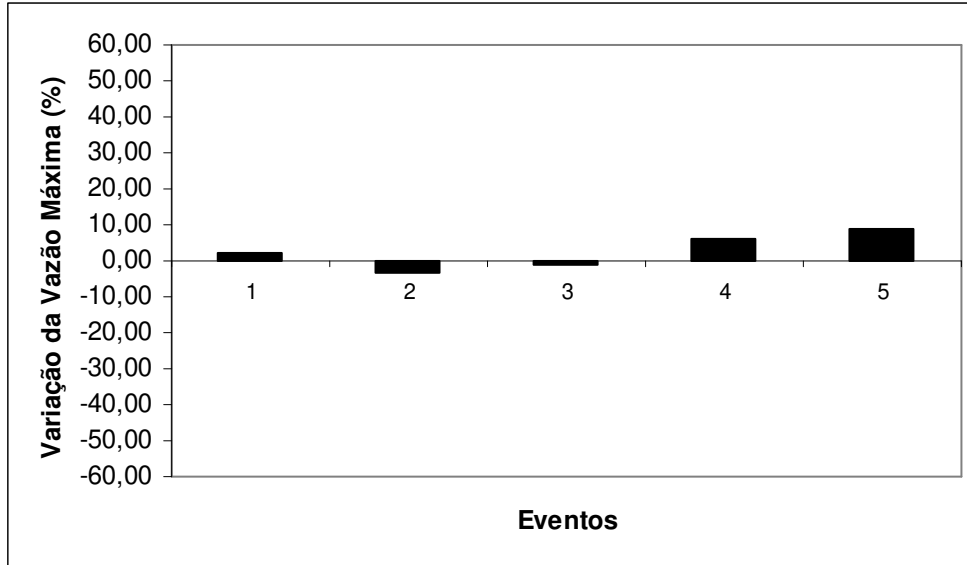
**Figura 69** - Vazão horária observada versus vazão horária simulada para o evento 5 de calibração do TOPMODEL considerando a hipótese H1 e respectivo modelo de regressão linear entre os valores.

### 5.1.2.2.1.3.5.2. Resultados considerando a hipótese H2 de distribuição da precipitação interceptada

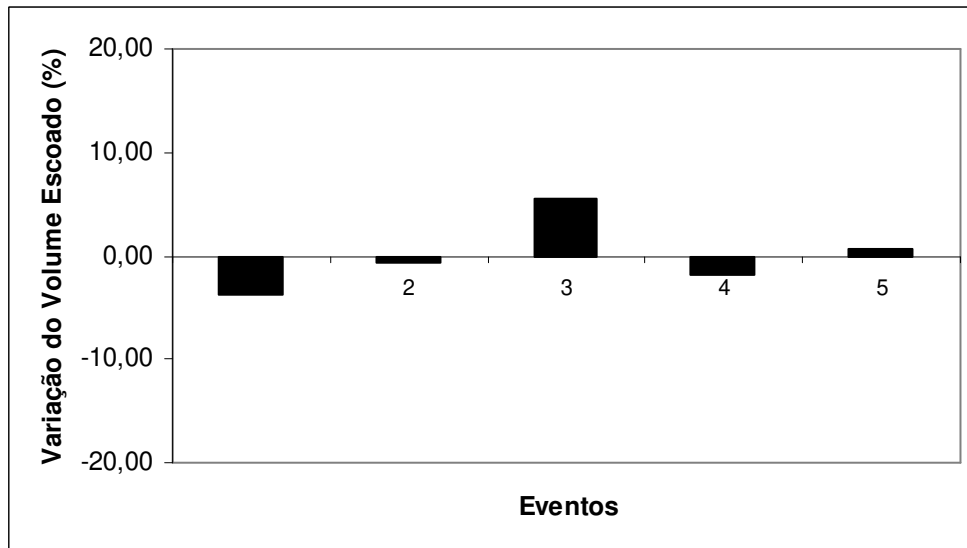
A tabela 17 apresenta de forma resumida os resultados principais das simulações de calibração utilizando o modelo TOPMODEL em conjunto a um modelo de interceptação vegetal, considerando a hipótese H2 de distribuição da precipitação interceptada. As figuras 70, 71, 72 e 73 também se referem aos resultados desta etapa do trabalho.

**Tabela 17**– Eventos de Calibração - Valores de duração dos eventos, precipitação que chega ao solo ( $P_s$ ), vazão máxima simulada ( $Q_{\text{maxsim}}$ ), volume escoado simulado ( $V_{\text{escsim}}$ ), coeficiente de escoamento simulado (Coef. de  $\text{esc}_{\text{sim}}$ ), considerando a hipótese H2 de distribuição da precipitação interceptada.

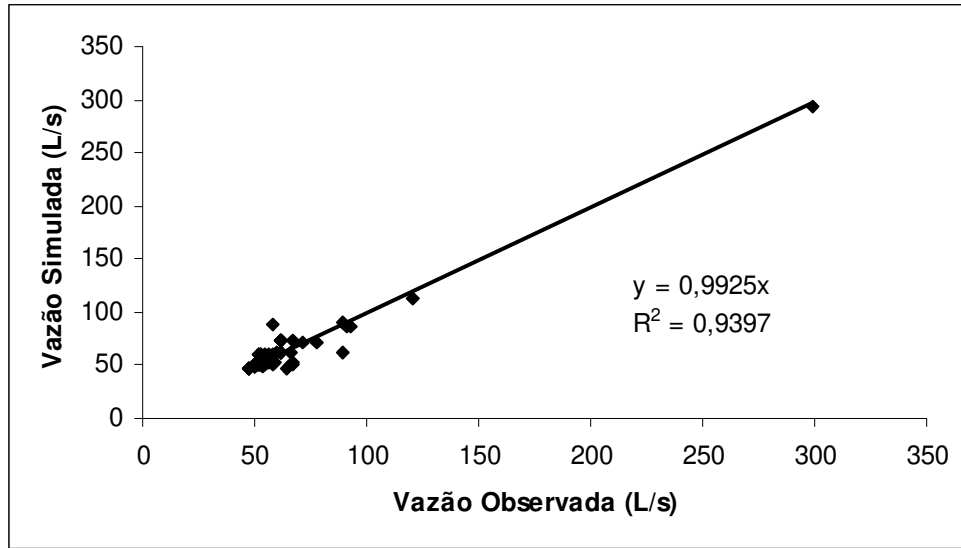
Evento	Período	Duração (h)	PS (mm)	$Q_{\text{maxsim}}$ (L/s)	$V_{\text{escsim}}$ (L)	Coef. de $\text{esc}_{\text{sim}}$ (%)
1	13/2/1999 a 14/2/1999	13	13,5	292,4	$4,11 \times 10^6$	4,9
2	16/1/2000 a 17/1/2000	26	18,1	87,8	$5,22 \times 10^6$	8,4
3	05/3/2001 a 06/3/2001	15	17,1	90,1	$2,85 \times 10^6$	3,6
4	08/3/2001 a 09/3/2001	16	18,9	113,2	$3,64 \times 10^6$	4,2
5	10/3/2001	13	7,7	51,8	$2,40 \times 10^6$	6,8



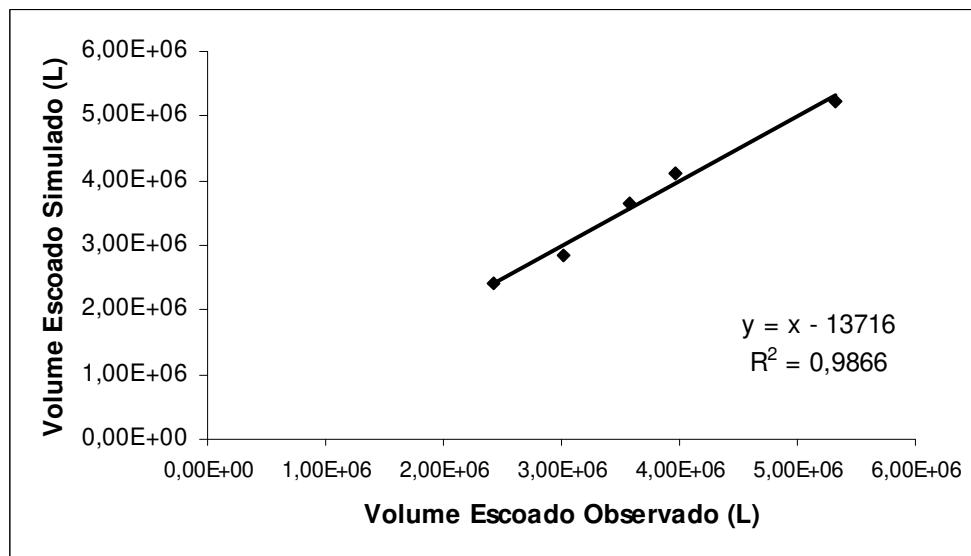
**Figura 70** – Variação da vazão máxima observada e simulada para os eventos de calibração considerando a hipótese H2.



**Figura 71** – Variação do volume escoado observado e simulado para os eventos de calibração considerando a hipótese H2.



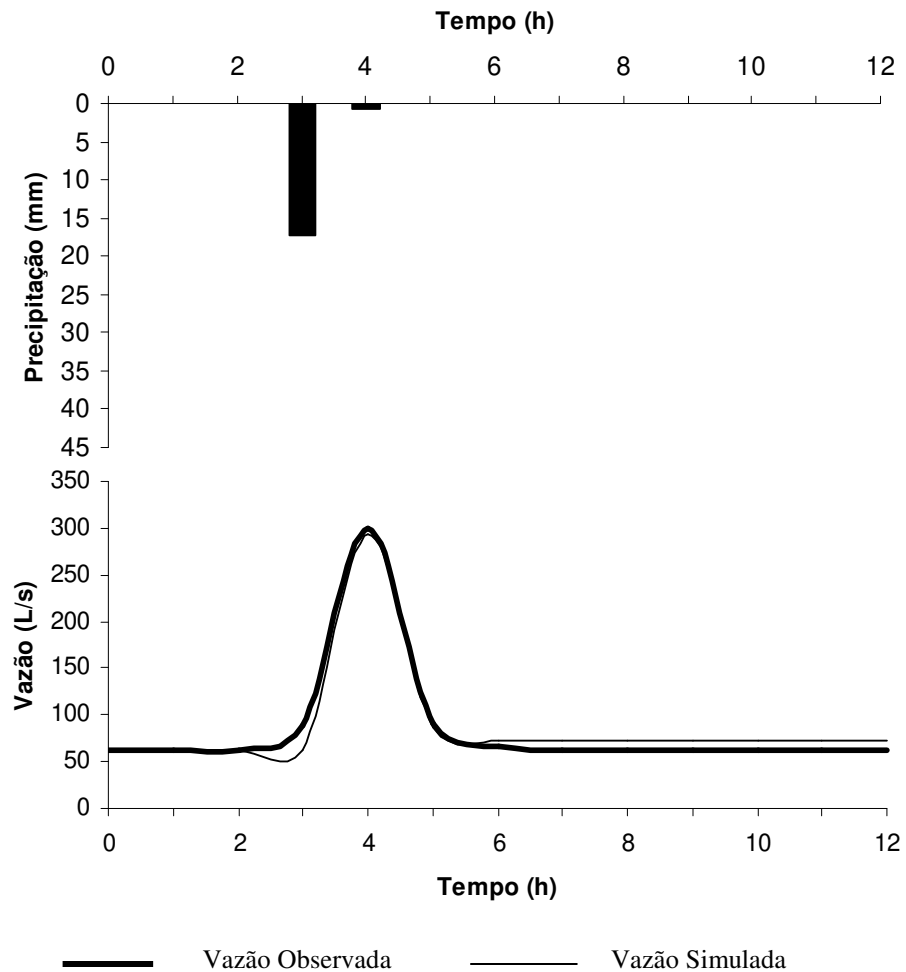
**Figura 72** – Vazão horária observada versus vazão horária simulada para os eventos de calibração, considerando a hipótese H2, e modelo de regressão linear entre os valores.



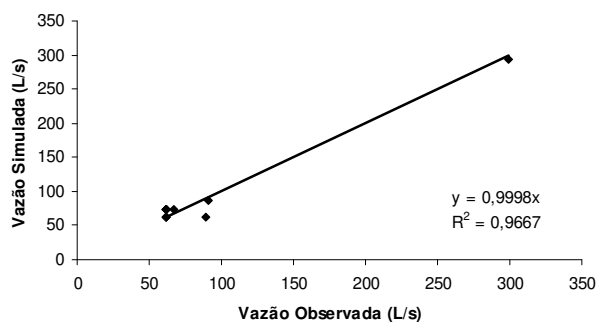
**Figura 73** – Volume escoado observado versus volume escoado simulado para os eventos de calibração, considerando H2 e modelo de regressão linear entre os valores.

A seguir, cada evento é analisado isoladamente sendo que, os resultados obtidos são mostrados nas figuras 74, 76, 78, 80 e 82 onde podem ser observados os ietogramas e hidrogramas. A avaliação do resultado da simulação pela relação entre os dados observados e simulados de vazão foi efetuada a partir das figuras 75, 77, 79, 91 e 83. Todos os ietogramas e hidrogramas são mostrados em uma única escala para efeitos de comparação. No capítulo apêndices (seção B.2.1), os mesmo são apresentados em escala diferenciada permitindo uma melhor visualização (figuras 162 a 168).

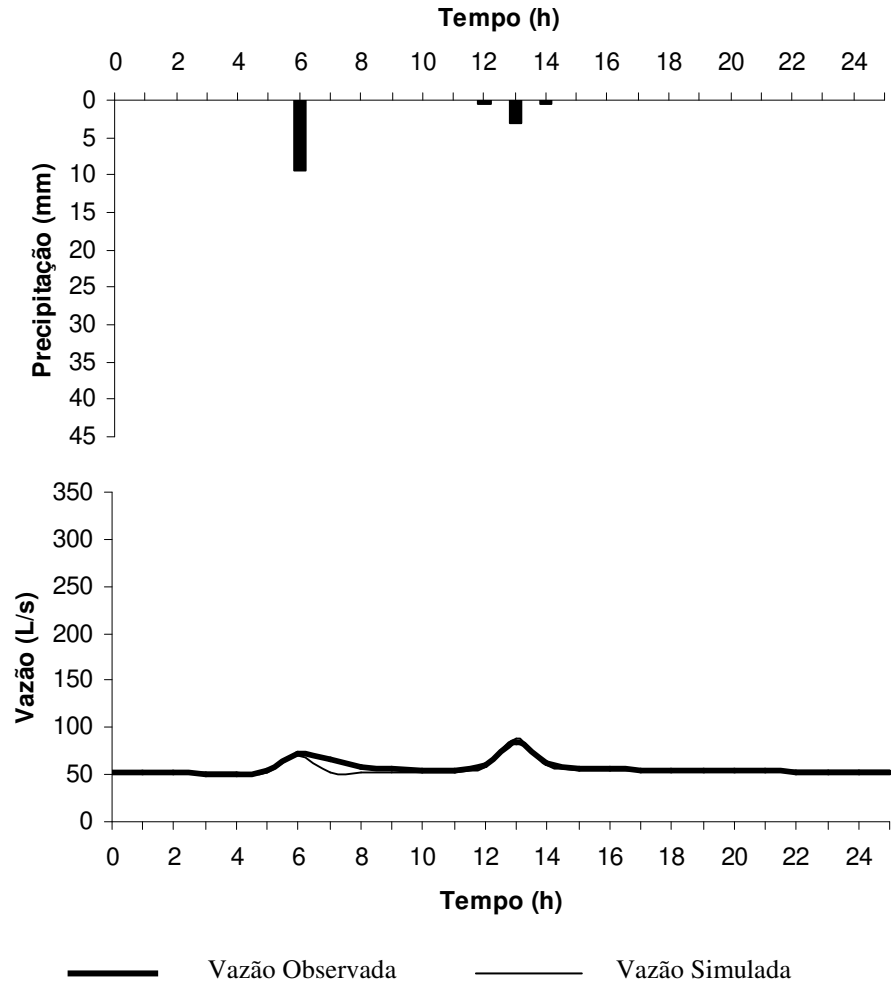




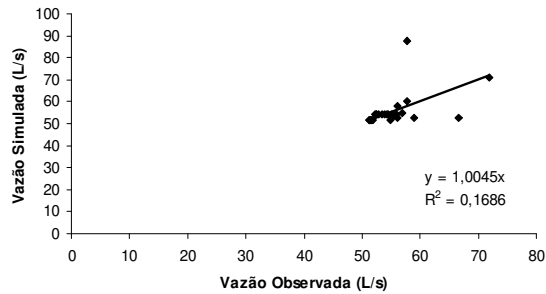
**Figura 74** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 1 (13/2/1999 a 14/2/1999) utilizado no processo de calibração na aplicação do modelo TOPMODEL considerando a hipótese H2.



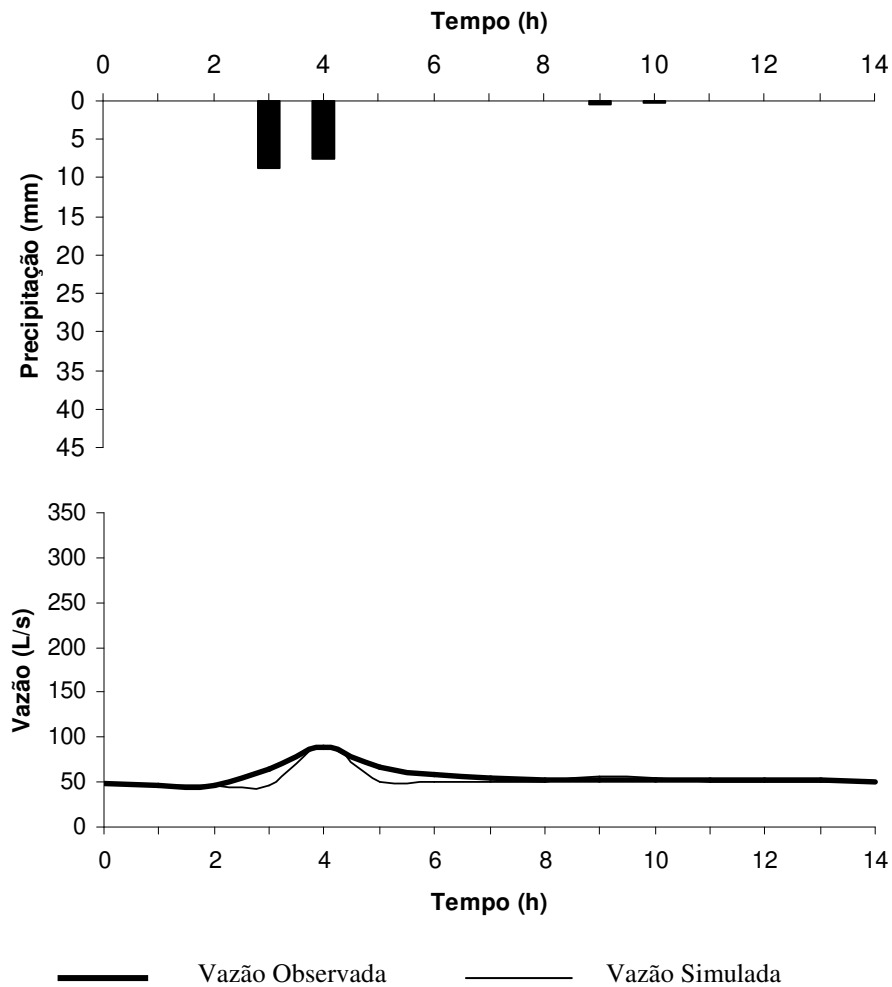
**Figura 75** - Vazão horária observada versus vazão horária simulada para o evento 1 de calibração do TOPMODEL considerando a hipótese H2 e respectivo modelo de regressão linear entre os valores.



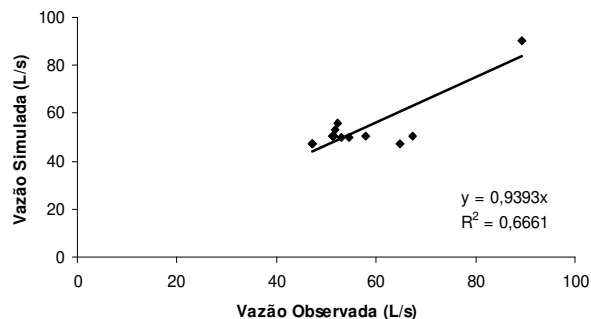
**Figura 76** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 2 (16/1/2000 a 17/12/2000) utilizado no processo de calibração na aplicação do modelo TOPMODEL considerando a hipótese H2.



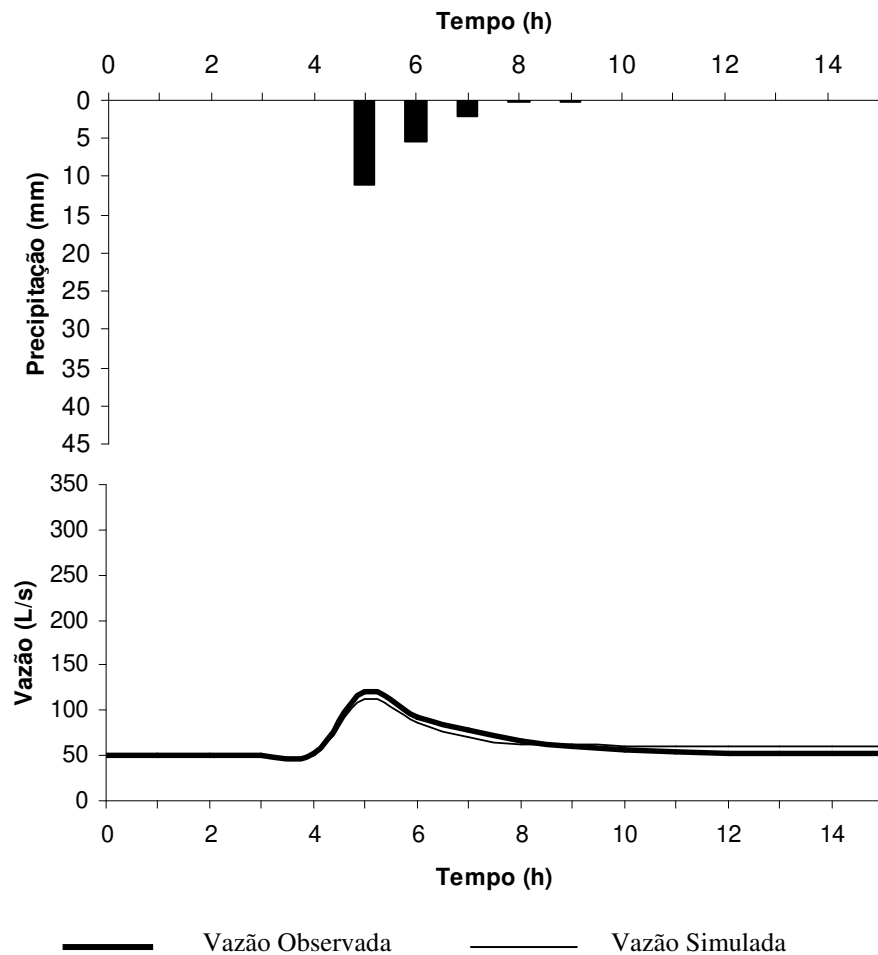
**Figura 77** - Vazão horária observada versus vazão horária simulada para o evento 2 de calibração do TOPMODEL considerando H2 e respectivo modelo de regressão linear entre os valores.



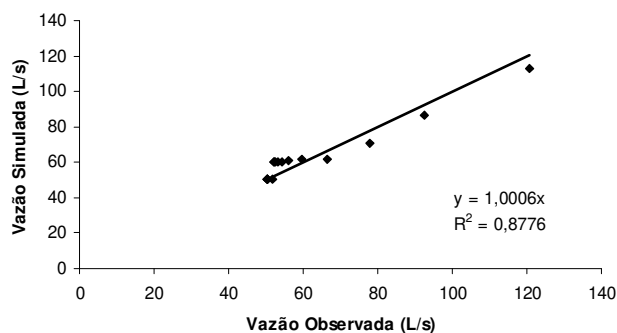
**Figura 78** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 3 (05/3/2001 a 06/3/2001) utilizado no processo de calibração na aplicação do modelo TOPMODEL considerando a hipótese H2.



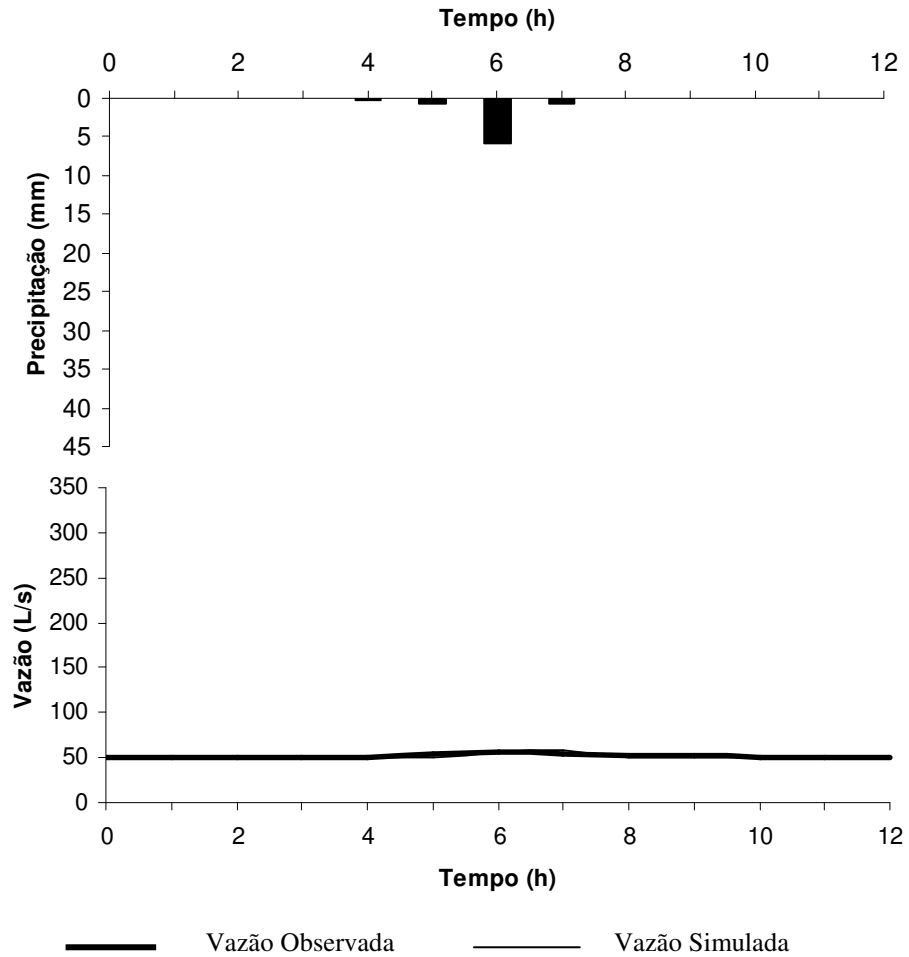
**Figura 79** - Vazão horária observada versus vazão horária simulada para o evento 3 de calibração do TOPMODEL considerando a hipótese H2 e respectivo modelo de regressão linear entre os valores.



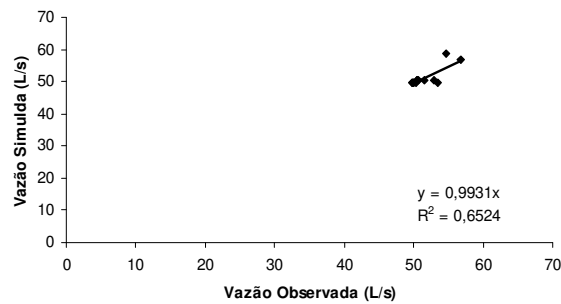
**Figura 80** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 4 (08/3/2001 a 09/3/2001) utilizado no processo de calibração na aplicação do modelo TOPMODEL considerando a hipótese H2.



**Figura 81** - Vazão horária observada versus vazão horária simulada para o evento 4 de calibração do TOPMODEL considerando a hipótese H2 e respectivo modelo de regressão linear entre os valores.



**Figura 82** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 5 (10/3/20001) utilizado no processo de calibração na aplicação do modelo TOPMODEL considerando a hipótese H2.



**Figura 83** - Vazão horária observada versus vazão simulada horária para o evento 5 de calibração do TOPMODEL considerando a hipótese H2 e respectivo modelo de regressão linear entre os valores.

#### 5.1.2.2.1.4. Eventos de validação

##### 5.1.2.2.1.4.1. Interceptação Vegetal

Considerando os eventos do item 4.4.2.1.2.1, foi aplicado o modelo de interceptação vegetal descrito no item 4.4.2.2.1, adotando-se os valores de IAF da tabela 9. Os valores obtidos com a aplicação do modelo de CASTILHO (2000) são apresentados na tabela 18.

**Tabela 18** - Valores de precipitação total ( $P_T$ ); de IAF; dos coeficientes angular e linear, da lâmina de água no solo ( $P_L$ ) resultantes da aplicação do modelo de CASTILHO (2000) para os eventos de validação.

Evento	Dias Corridos	$P_T$ (mm)	IAF médio	Coefficiente angular (a)	Coefficiente linear (b)	$P_L$ (mm)
1	51 - 52	76,2	2,83	0,54	0,10	41,1
2	58 - 59	9,1	2,84	0,54	0,10	5,0
3	344 - 345	16,5	2,40	0,56	0,10	9,3
4	345 - 346	23,4	2,40	0,56	0,10	13,2
5	347 - 348	21,1	2,40	0,56	0,10	11,9
6	348	10,7	2,40	0,56	0,10	6,1
7	17 - 18	19,6	2,73	0,54	0,10	10,7
8	25 - 26	17,3	2,77	0,54	0,10	9,5
9	26 - 27	3,8	2,77	0,54	0,10	0,0
10	177 - 178	11,7	1,28	0,61	0,10	7,2

##### 5.1.2.2.1.4.2. Escoamento pelo colmo

Os valores de escoamento pelo colmo foram calculados fazendo uso da equação 28 e os resultados para os eventos de calibração constam na tabela 19.

**Tabela 19** – Valores de escoamento pelo colmo (EC) resultantes da aplicação do modelo de escoamento pelo colmo para os eventos de validação.

Evento	EC (mm)
1	6,9
2	3,6
3	4,5
4	5,1
5	4,9
6	3,9
7	4,8
8	4,6
9	1,6
10	4,0

Os valores de precipitação que chega ao solo ( $P_S$ ) usados nas simulações de validação e também os do coeficiente  $\phi$  constam na tabela 20.

**Tabela 20** – Valores de  $P_S$  e  $\phi$  determinados para os eventos de validação do modelo TOPMODEL em conjunto com um modelo de interceptação vegetal.

Evento	$P_S$ (mm)	$\phi$
1	48,0	0,63
2	8,6	0,94
3	13,8	0,84
4	18,3	0,78
5	16,8	0,80
6	10,0	0,93
7	15,5	0,79
8	14,1	0,81
9	1,6	0,42
10	11,2	0,96

#### 5.1.2.2.1.4.3. Ajustes dos parâmetros

##### 5.1.2.2.1.3.3.1. Ajustes dos parâmetros considerando a hipótese H1 de distribuição da precipitação interceptada

Os parâmetros fator de forma, transmissividade lateral saturada, velocidade de propagação do canal e capacidade máxima de armazenamento na zona radicular utilizados foram os estabelecidos no processo de calibração da aplicação do TOPMODEL em conjunto a um modelo de interceptação vegetal.

Para o parâmetro déficit inicial de umidade na zona radicular ( $SR_0$ ) buscou-se um valor que melhor se ajustasse às condições de cada um dos eventos. A tabela 21 apresenta os valores do déficit inicial de umidade na zona radicular ( $SR_0$ ) e os valores de eficiência de Nash e Sucliffe (E) dos eventos de calibração.

**Tabela 21** – Valores do parâmetro déficit inicial de umidade na zona radicular ( $SR_0$ ) do modelo TOPMODEL e de eficiência de Nash e Sucliffe (E) dos eventos de calibração considerando a hipótese H1 de distribuição da precipitação interceptada.

Evento	$SR_0$ (m)	E (%)
1	0,02940	68
2	0,00100	75
3	0,01120	- 92
4	0,01130	24
5	0,01050	92
6	0,00570	47
7	0,00710	14
8	0,01080	- 0,013
9	0,010000	- 0,002
10	0,009795	12
<b>Valores médios</b>	<b>0,010680</b>	<b>24</b>

##### 5.1.2.2.1.4.3.2. Ajustes dos parâmetros considerando a hipótese H2 de distribuição da precipitação interceptada

Os valores dos parâmetros fator de forma, transmissividade lateral saturada, velocidade de propagação do canal e capacidade máxima de armazenamento na zona radicular foram os mesmos estabelecidos para hipótese H1.



A tabela 22 apresenta os valores do déficit inicial de umidade na zona radicular ( $SR_0$ ) e os valores de eficiência de Nash e Sucliffe (E) dos eventos de calibração considerando a hipótese H2 de distribuição da precipitação interceptada.

**Tabela 22** – Valores do parâmetro déficit inicial de umidade na zona radicular ( $SR_0$ ) do modelo TOPMODEL e de eficiência de Nash e Sucliffe (E) dos eventos de calibração considerando a hipótese H2.

<b>Evento</b>	<b><math>SR_0</math> (m)</b>	<b>E (%)</b>
1	0,02800	71
2	0,00100	76
3	0,01140	- 0,009
4	0,00990	-0,008
5	0,01030	93
6	0,00598	63
7	0,00700	16
8	0,01035	- 0,022
9	0,010000	- 0,002
10	0,009730	14
<b>Valores médios</b>	<b>0,010037</b>	<b>33</b>

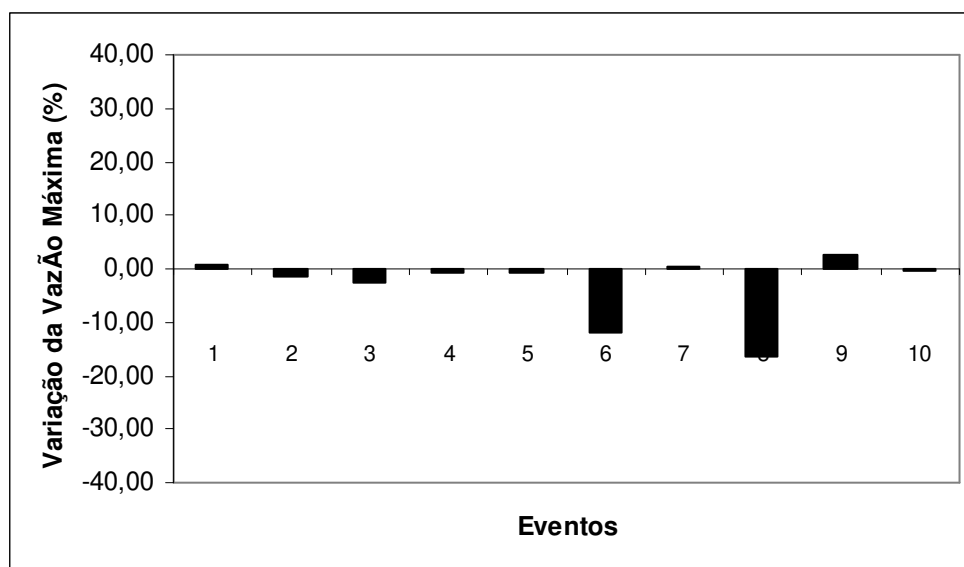
#### **5.1.2.2.1.4.4. Resultados**

##### **5.1.2.2.1.4.4.1. Resultados considerando a hipótese H1 de distribuição da precipitação interceptada**

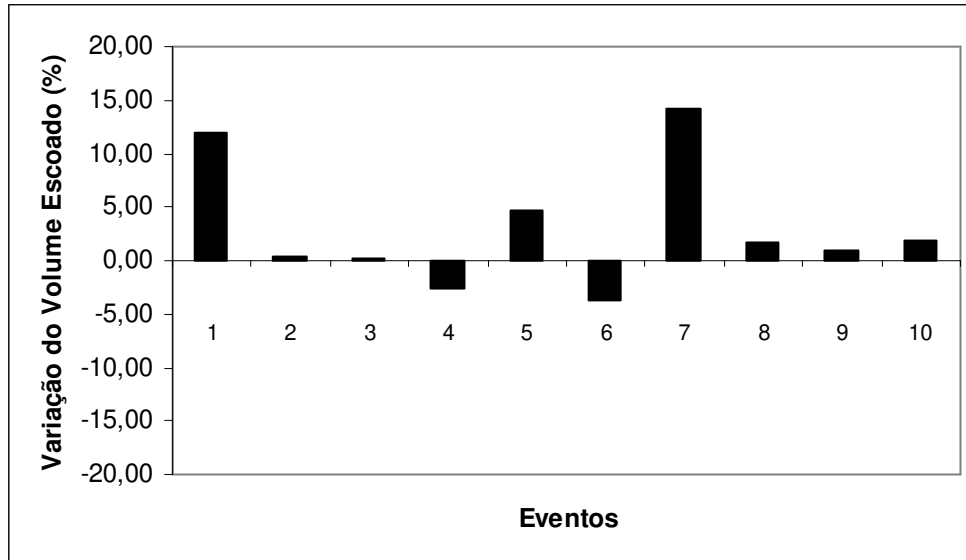
A tabela 23 apresenta de forma resumida os resultados principais das simulações de validação utilizando o modelo TOPMODEL em conjunto a um modelo de interceptação vegetal, considerando a hipótese H1 de distribuição da precipitação interceptada. As figuras 84, 85, 86 e 87 foram elaboradas a partir dos resultados desta etapa do trabalho.

**Tabela 23** – Eventos de Validação - Valores de duração dos eventos, precipitação total corrigida ( $P_s$ ), vazão máxima simulada ( $Q_{\text{maxsim}}$ ), volume escoado simulado ( $V_{\text{escsim}}$ ), coeficiente de escoamento simulado (Coef. de  $\text{esc}_{\text{sim}}$ ), considerando a hipótese H1 de distribuição da precipitação interceptada.

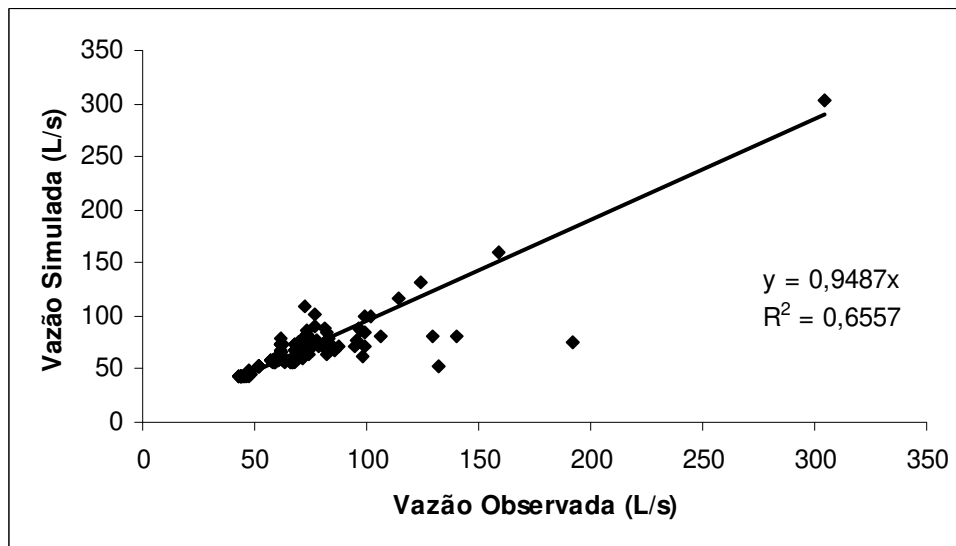
Evento	Período	Duração (h)	$P_s$ (mm)	$Q_{\text{maxsim}}$ (L/s)	$V_{\text{escsim}}$ (L)	Coef. de $\text{esc}_{\text{sim}}$ (%)
1	20/2/1999 a 21/2/1999	23	48,0	302,4	$6,65 \times 10^6$	3,0
2	27/2/1999 a 28/2/1999	18	8,6	115,8	$4,47 \times 10^6$	11,3
3	10/12/1999 a 11/12/1999	22	13,8	90,0	$5,84 \times 10^6$	9,2
4	11/12/1999 a 12/12/1999	24	18,2	102,3	$6,80 \times 10^6$	8,1
5	13/12/1999 a 14/12/1999	17	16,8	159,8	$4,60 \times 10^6$	5,9
6	14/12/1999	22	9,9	110,1	$6,06 \times 10^6$	13,3
7	17/1/2000 a 18/1/2000	21	15,5	131,6	$4,45 \times 10^6$	6,2
8	25/1/2000 a 26/1/2000	30	14,1	78,9	$6,37 \times 10^6$	9,9
9	26/1/2000 a 27/1/2000	26	1,6	59,8	$5,56 \times 10^6$	75,6
10	25/6/2000 a 26/6/2000	19	11,2	48,2	$2,99 \times 10^6$	5,8



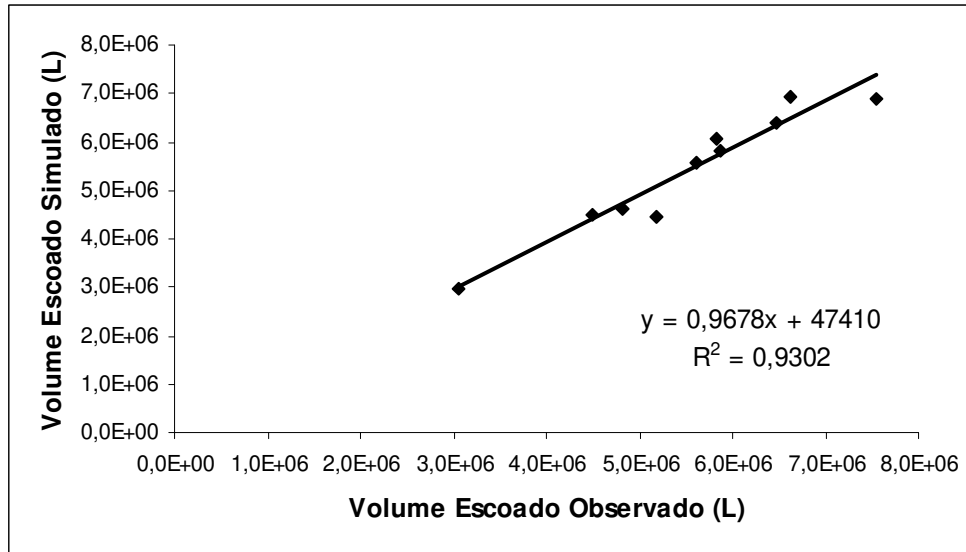
**Figura 84** – Variação da vazão máxima observada e simulada para os eventos de validação considerando a hipótese H1.



**Figura 85** – Variação do volume escoado observado e simulado para os eventos de validação considerando a hipótese H1.

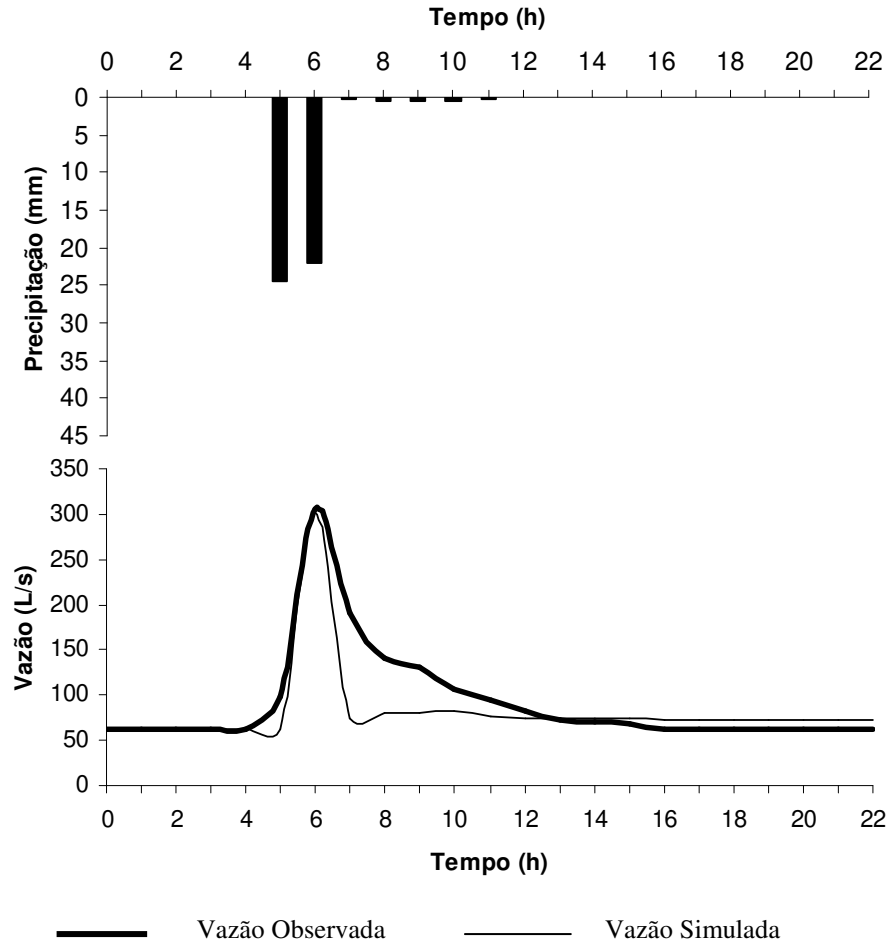


**Figura 86** – Vazão horária observada versus vazão horária simulada para os eventos de validação, considerando a hipótese H1, e modelo de regressão linear entre os valores.

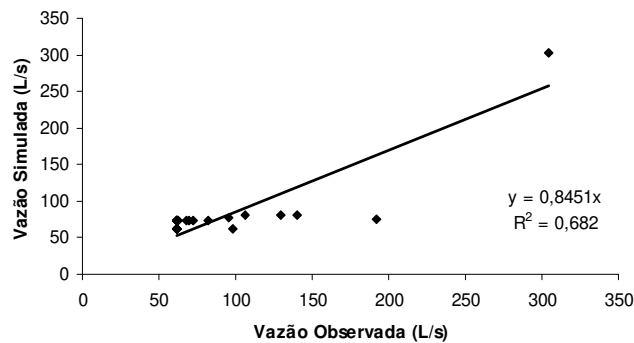


**Figura 87** – Volume escoado observado versus volume escoado simulado para os eventos de validação, considerando a hipótese H1 e modelo de regressão linear.

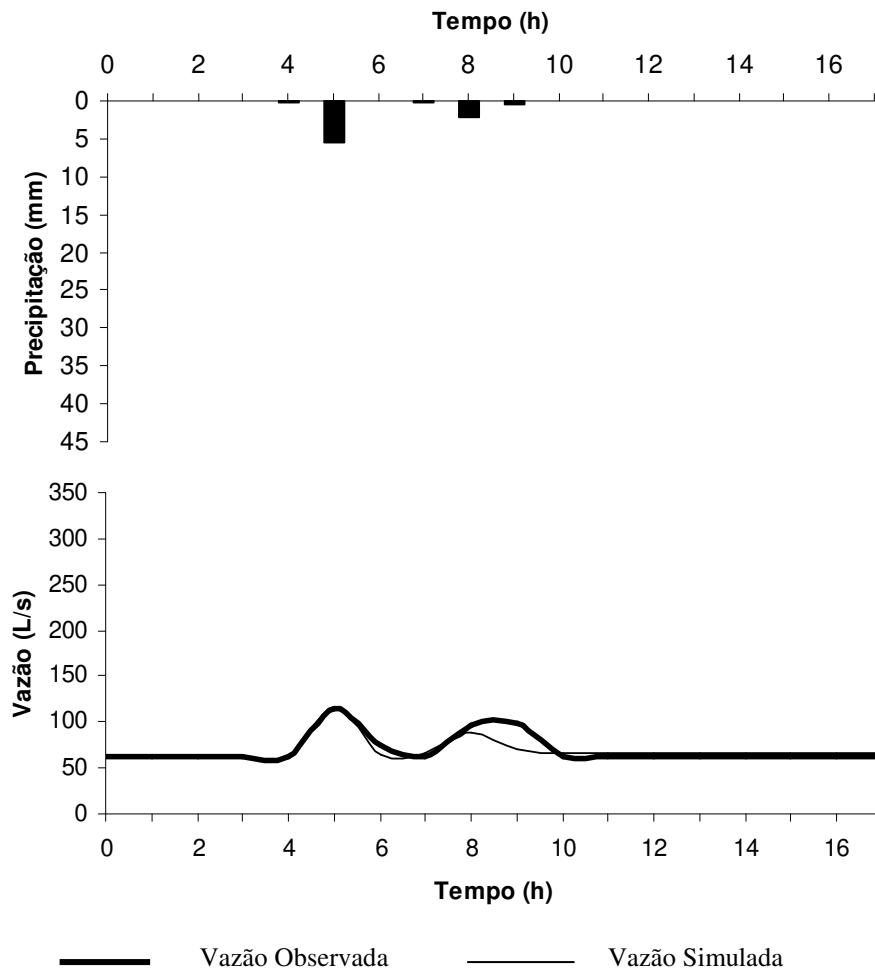
A seguir, cada evento é analisado isoladamente sendo que, os resultados obtidos são mostrados nas figuras 88, 90, 92, 94, 96, 98, 100, 102, 104 e 106, nas quais podem ser observados os ietogramas e hidrogramas. A avaliação do resultado da simulação pela relação entre os dados observados e simulados de vazão foi efetuada a partir das figuras 89, 91, 93, 95, 97, 99, 101, 103, 105 e 107. Todos os ietogramas e hidrogramas são mostrados em uma única escala para efeitos de comparação. No capítulo apêndices (seção B.1.2), os mesmo são apresentados em escala diferenciada permitindo uma melhor visualização (figuras 152 a 161).



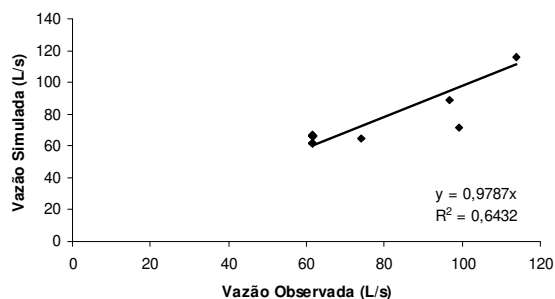
**Figura 88** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 1 (20/2/1999 a 21/2/1999) utilizado no processo de validação na aplicação do modelo TOPMODEL considerando a hipótese H1.



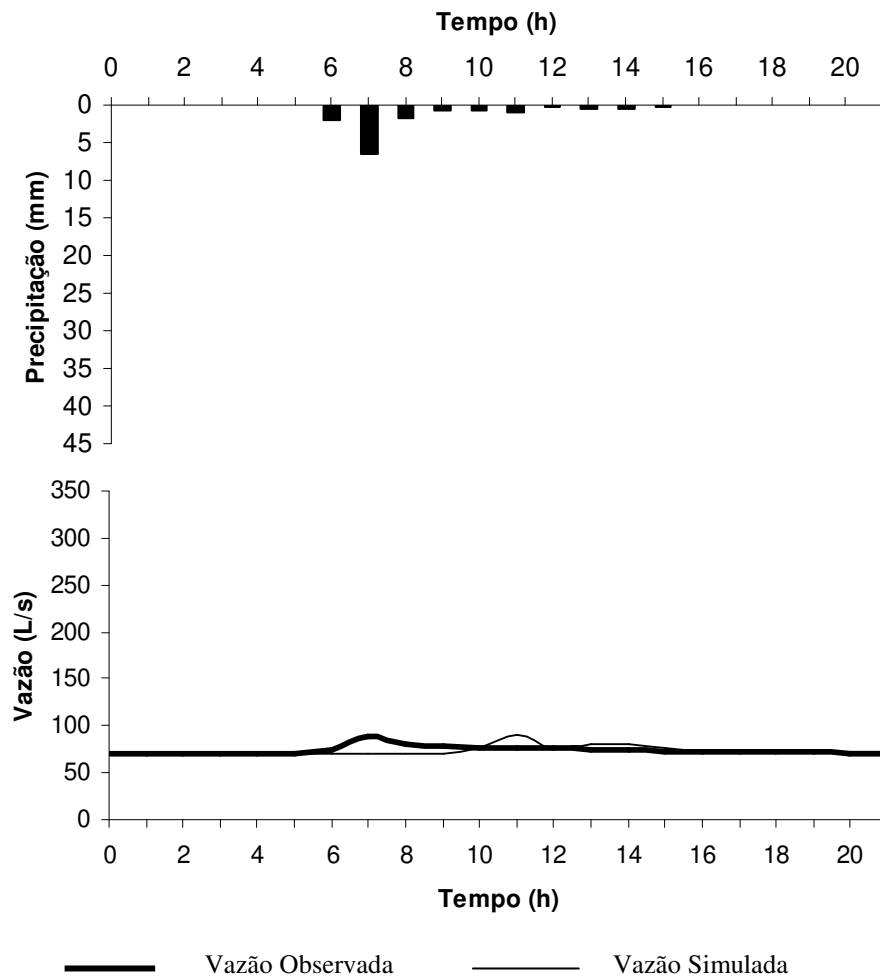
**Figura 89** – Vazão horária observada versus vazão horária simulada para o evento 1 de validação do TOPMODEL considerando a hipótese H1 e respectivo modelo de regressão linear entre os valores



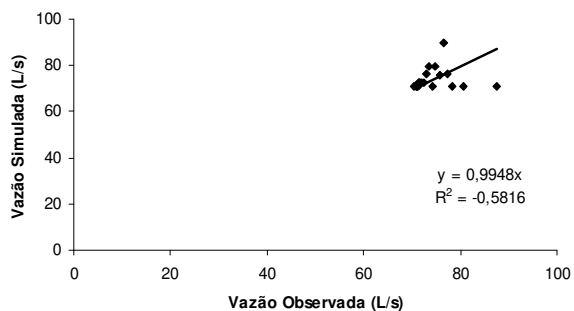
**Figura 90** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 2 (27/2/1999 a 28/2/1999) utilizado no processo de validação na aplicação do modelo TOPMODEL considerando a hipótese H1.



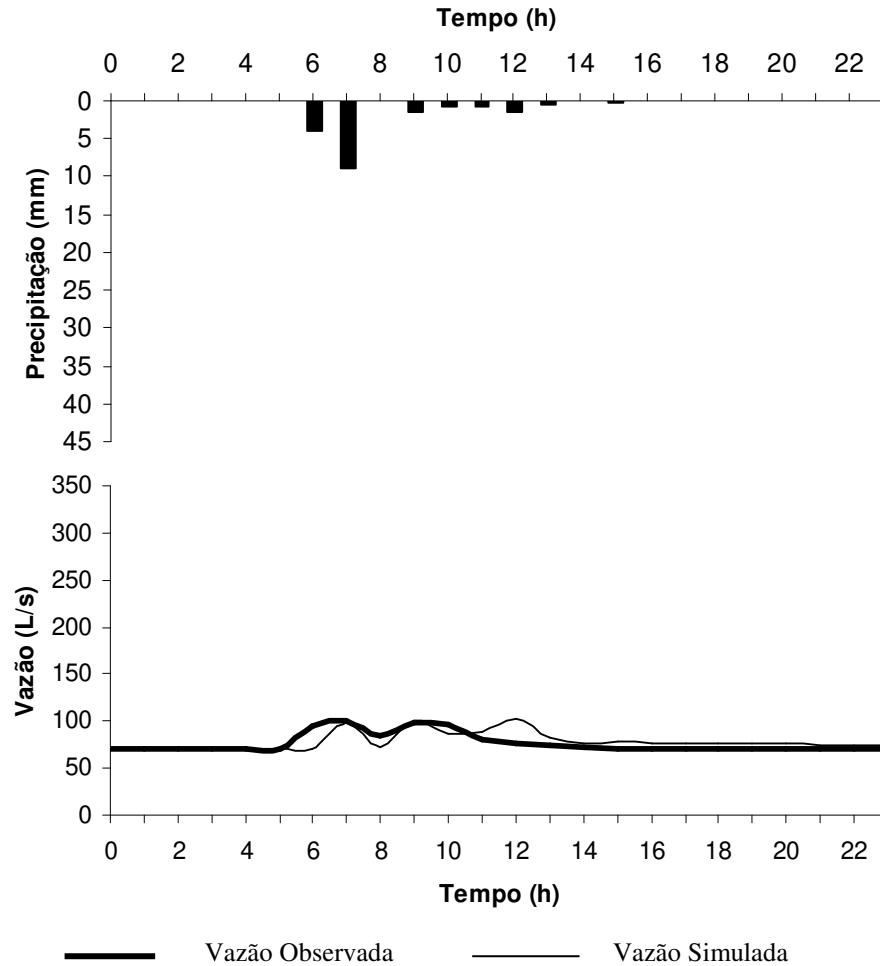
**Figura 91** – Vazão horária observada versus vazão horária simulada para o evento 2 de validação do TOPMODEL considerando a hipótese H1 e respectivo modelo de regressão linear entre os valores.



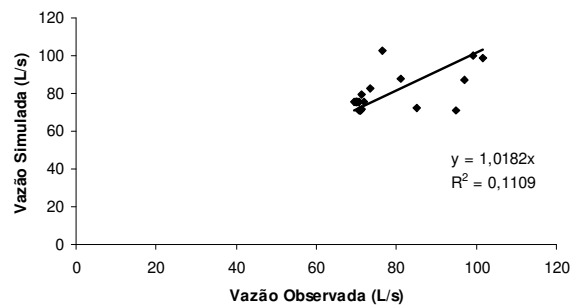
**Figura 92** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 3 (10/12/1999 a 11/12/1999) utilizado no processo de validação na aplicação do modelo TOPMODEL considerando a hipótese H1.



**Figura 93** – Vazão horária observada versus vazão horária simulada para o evento 3 de validação do TOPMODEL considerando a hipótese H1 e respectivo modelo de regressão linear entre os valores.

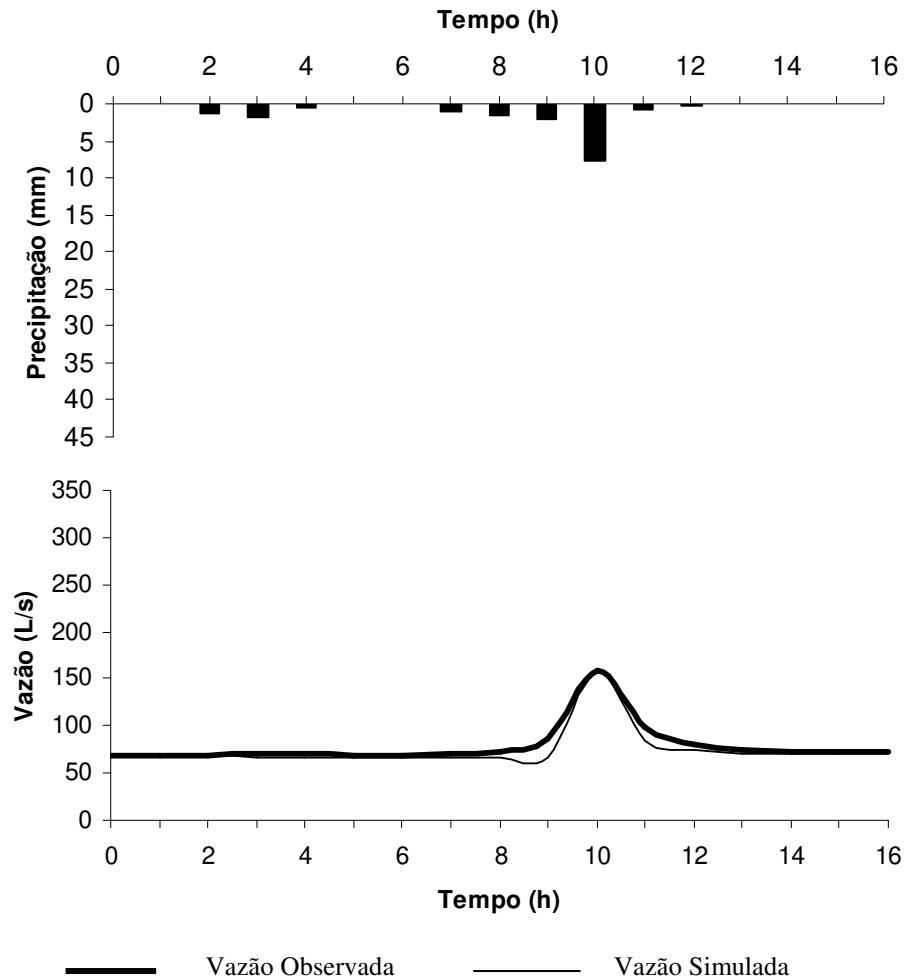


**Figura 94** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 4 (11/12/1999 a 12/12/1999) utilizado no processo de validação na aplicação do modelo TOPMODEL considerando a hipótese H1.

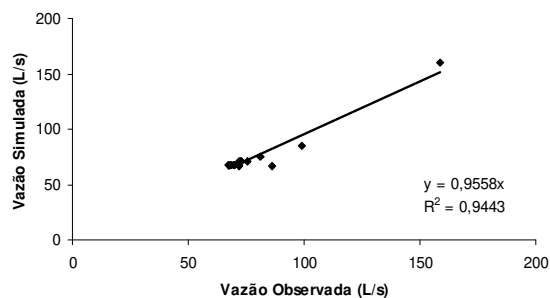


**Figura 95** – Vazão horária observada versus vazão horária simulada para o evento 4 de validação do TOPMODEL considerando a hipótese H1 e respectivo modelo de regressão linear.

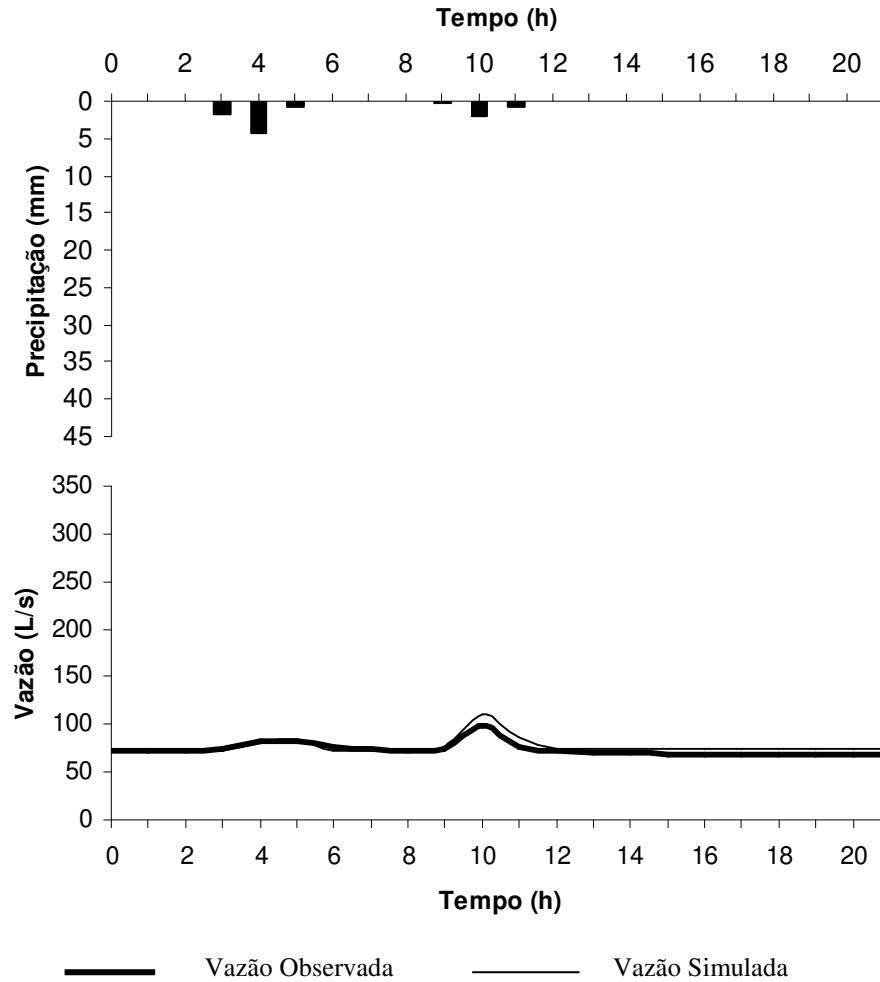




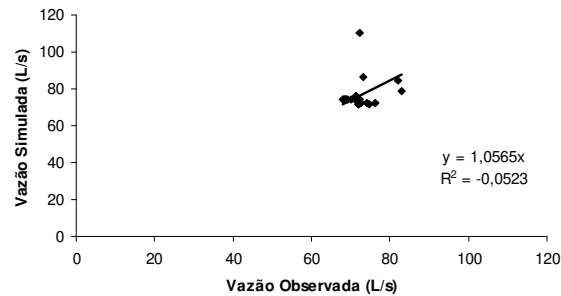
**Figura 96** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 5 (13/12/1999 a 14/12/1999) utilizado no processo de validação na aplicação do modelo TOPMODEL considerando a hipótese H1.



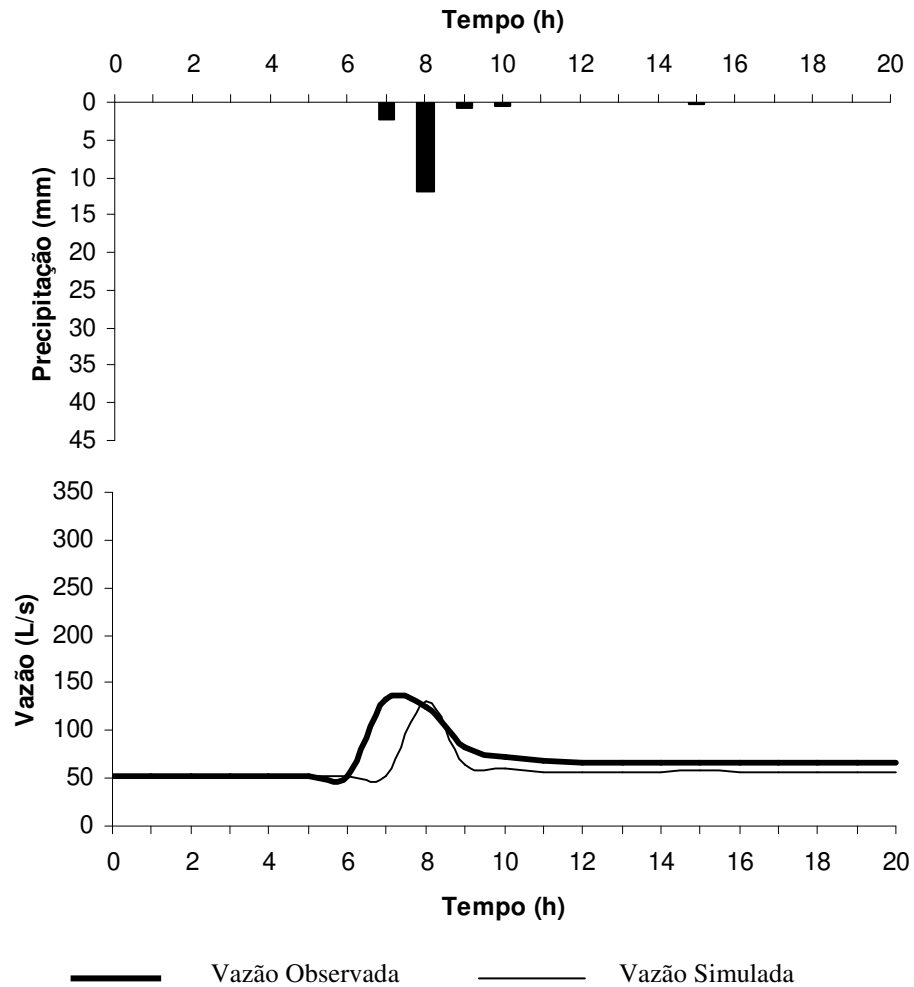
**Figura 97** – Vazão horária observada versus vazão horária simulada para o evento 5 de validação do TOPMODEL considerando a hipótese H1 e respectivo modelo de regressão linear.



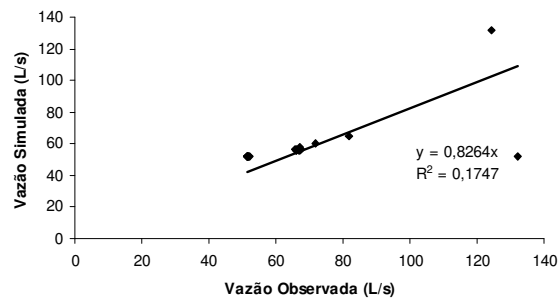
**Figura 98** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 6 (14/12/1999) utilizado no processo de validação na aplicação do modelo TOPMODEL considerando a hipótese H1.



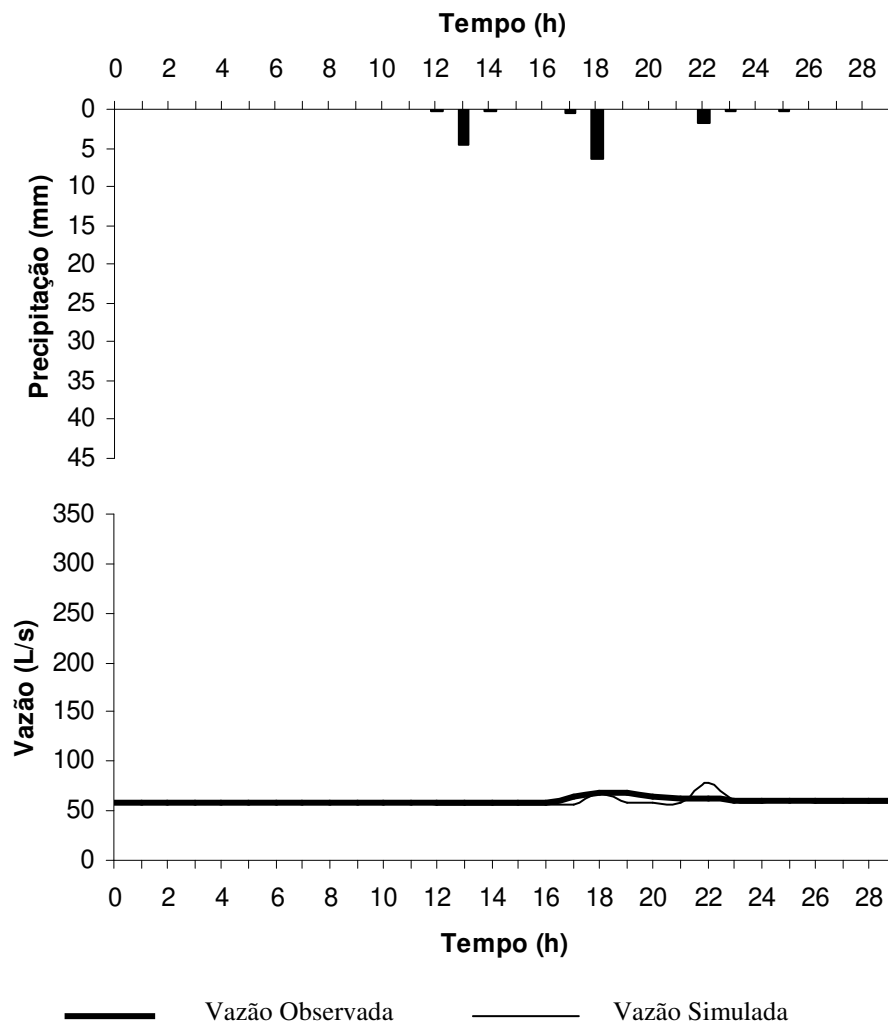
**Figura 99** – Vazão observada horária versus vazão horária simulada para o evento 6 de validação do TOPMODEL considerando H1 e respectivo modelo de regressão linear entre os valores.



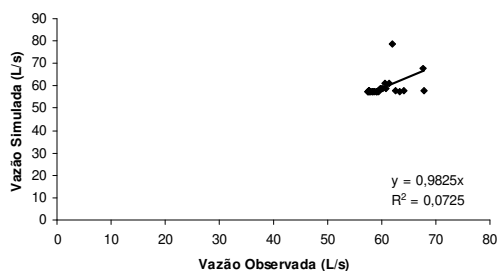
**Figura 100** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 7 (17/1/2000 a 18/1/2000) utilizado no processo de validação na aplicação do modelo TOPMODEL considerando a hipótese H1.



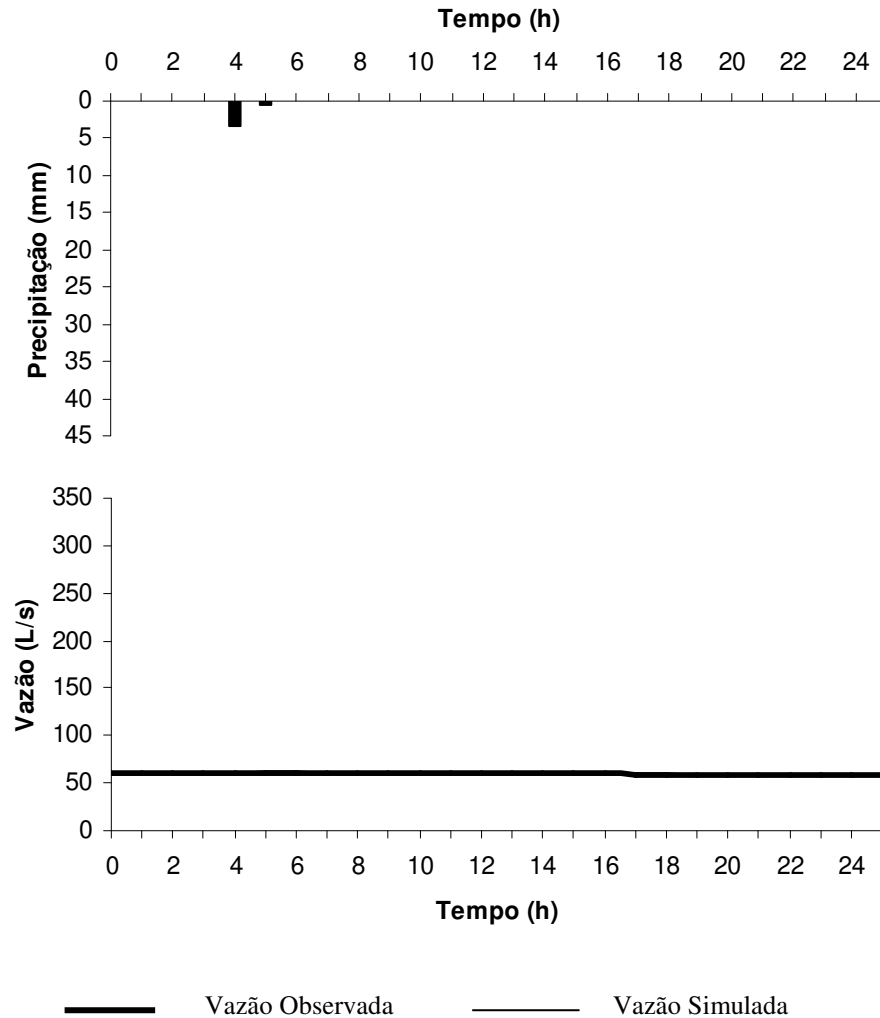
**Figura 101** – Vazão observada versus vazão simulada para o evento 7 de validação do TOPMODEL considerando a hipótese H1 e respectivo modelo de regressão linear entre os valores.



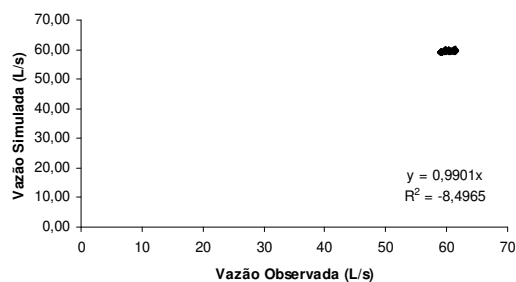
**Figura 102** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 8 (25/1/2000 a 26/1/2000) utilizado no processo de validação na aplicação do modelo TOPMODEL considerando a hipótese H1.



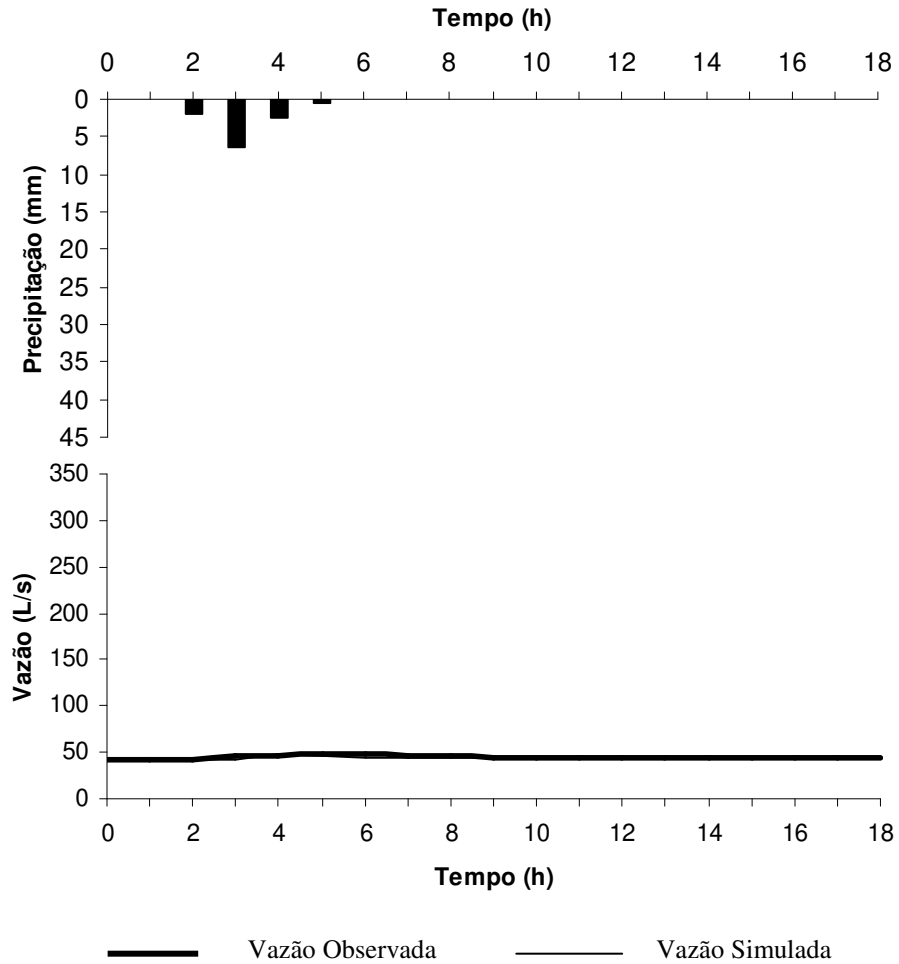
**Figura 103** – Vazão observada versus vazão simulada para o evento 8 de validação do TOPMODEL considerando a hipótese H1 e respectivo modelo de regressão linear entre os valores.



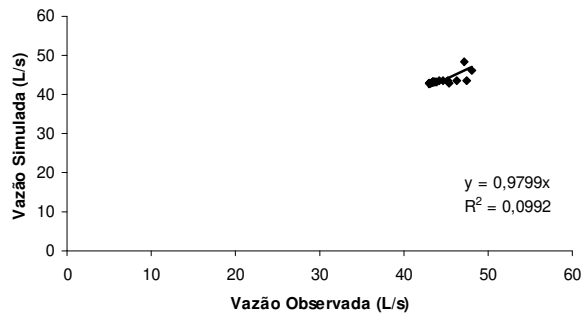
**Figura 104** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 9 (26/1/2000 a 27/1/2000) utilizado no processo de validação na aplicação do modelo TOPMODEL considerando a hipótese H1.



**Figura 105** – Vazão horária observada versus vazão horária simulada para o evento 9 de validação do TOPMODEL considerando a hipótese H1 e respectivo modelo de regressão linear entre os valores.



**Figura 106** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 10 (25/6/2000 a 26/6/2000) utilizado no processo de validação na aplicação do modelo TOPMODEL considerando a hipótese H1.



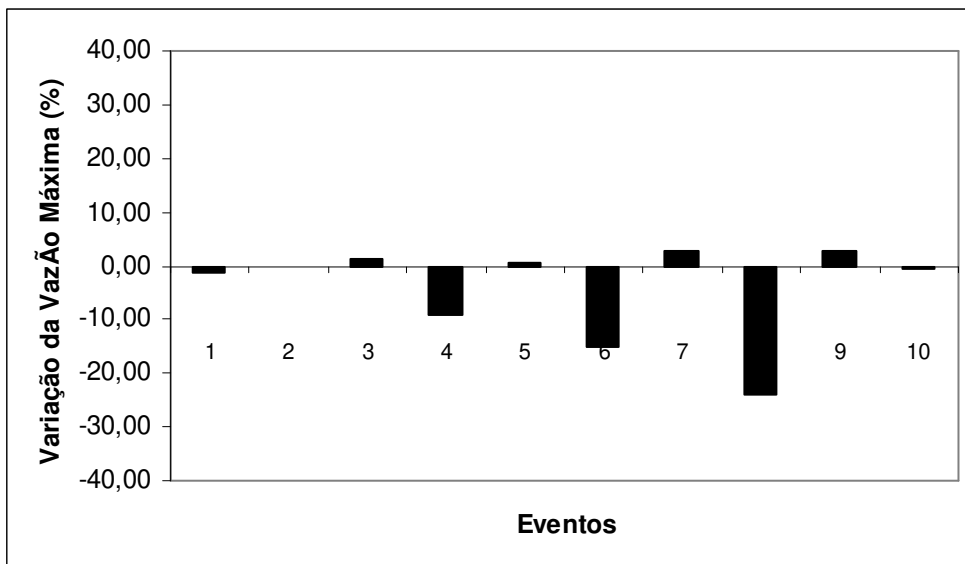
**Figura 107** – Vazão horária observada versus vazão horária simulada para o evento 10 de validação do TOPMODEL considerando a hipótese H1 e respectivo modelo de regressão linear.

#### 5.1.2.2.1.4.4.2. Resultados considerando a hipótese H2 de distribuição da precipitação interceptada

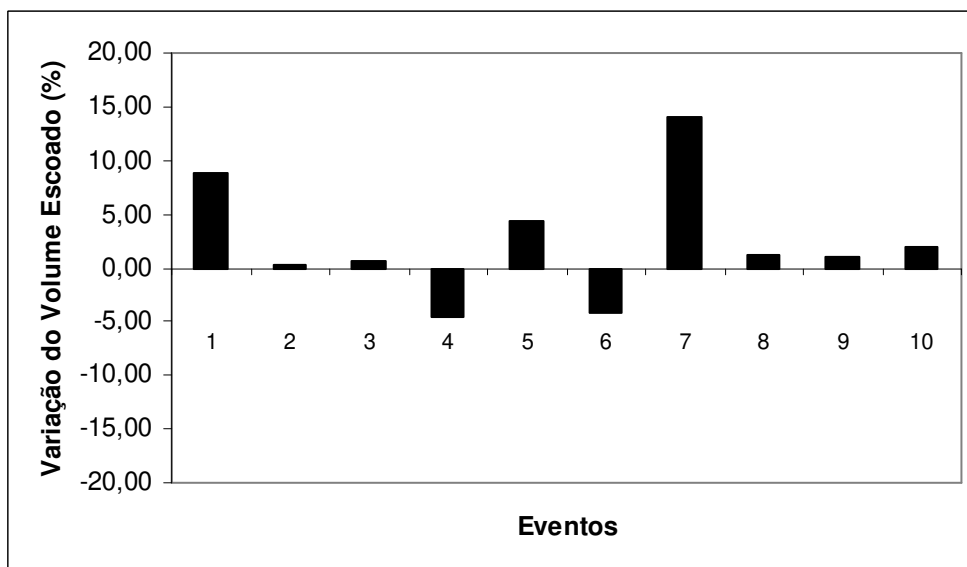
A tabela 24 apresenta de forma resumida os resultados principais das simulações de validação utilizando o modelo TOPMODEL em conjunto a um modelo de interceptação vegetal, considerando a hipótese H2 de distribuição da precipitação interceptada. As figuras 108, 109, 110 e 111 foram elaboradas a partir dos resultados obtidos nesta etapa do trabalho.

**Tabela 24** – Eventos de Validação - Valores de duração dos eventos, precipitação total corrigida ( $P_S$ ), vazão máxima simulada ( $Q_{\text{maxsim}}$ ), volume escoado simulado ( $V_{\text{escsim}}$ ), coeficiente de escoamento simulado (Coef. de  $\text{esc}_{\text{sim}}$ ), considerando a hipótese H2 de distribuição da precipitação interceptada.

Evento	Período	Duração (h)	$P_S$ (mm)	$Q_{\text{maxsim}}$ (L/s)	$V_{\text{escsim}}$ (L)	Coef. de $\text{esc}_{\text{sim}}$ (%)
1	20/2/1999 a 21/2/1999	23	48,0	308,6	$6,89 \times 10^6$	3,1
2	27/2/1999 a 28/2/1999	18	8,6	114,2	$4,48 \times 10^6$	11,3
3	10/12/1999 a 11/12/1999	22	13,8	86,6	$5,82 \times 10^6$	9,2
4	11/12/1999 a 12/12/1999	24	18,2	110,8	$6,92 \times 10^6$	8,3
5	13/12/1999 a 14/12/1999	17	16,8	157,4	$4,61 \times 10^6$	6,0
6	14/12/1999	22	9,9	112,9	$6,08 \times 10^6$	13,4
7	17/1/2000 a 18/1/2000	21	15,5	128,5	$4,45 \times 10^6$	6,2
8	25/1/2000 a 26/1/2000	30	14,1	83,8	$6,40 \times 10^6$	9,9
9	26/1/2000 a 27/1/2000	26	1,6	59,8	$5,56 \times 10^6$	75,6
10	25/6/2000 a 26/6/2000	19	11,2	48,3	$2,99 \times 10^6$	5,8

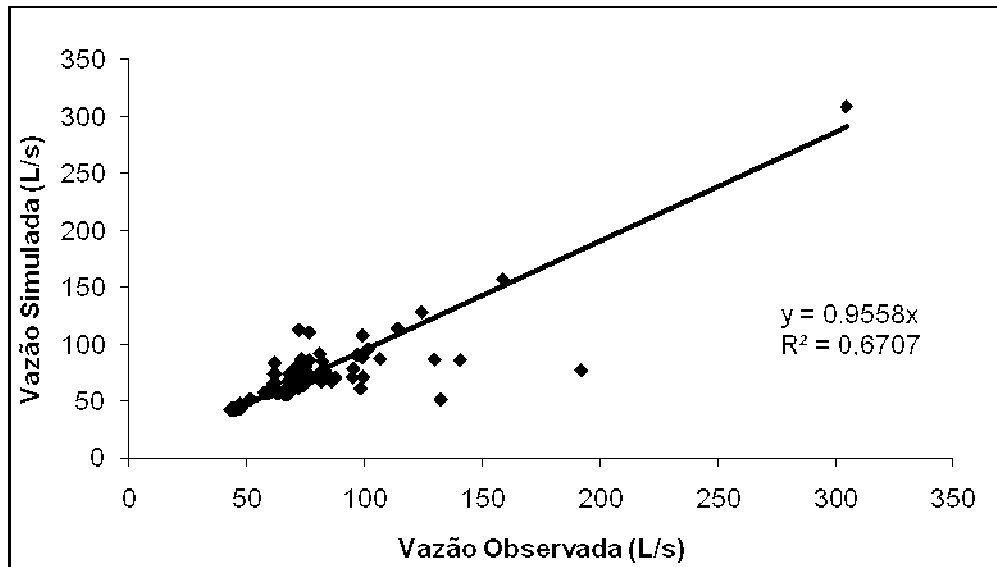


**Figura 108** – Variação da vazão máxima observada e simulada para os eventos de validação considerando a hipótese H2.

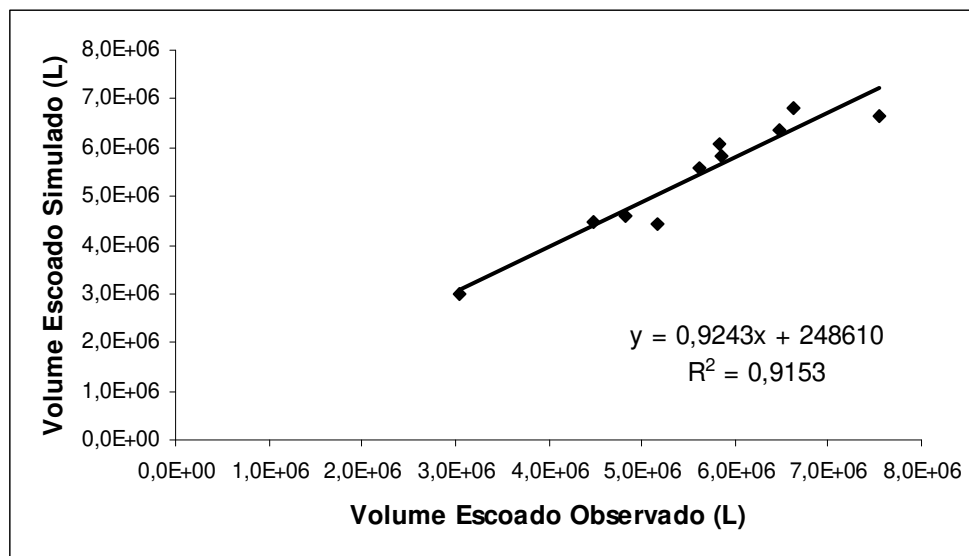


**Figura 109** – Variação do volume escoado observado e simulado para os eventos de validação considerando a hipótese H2.



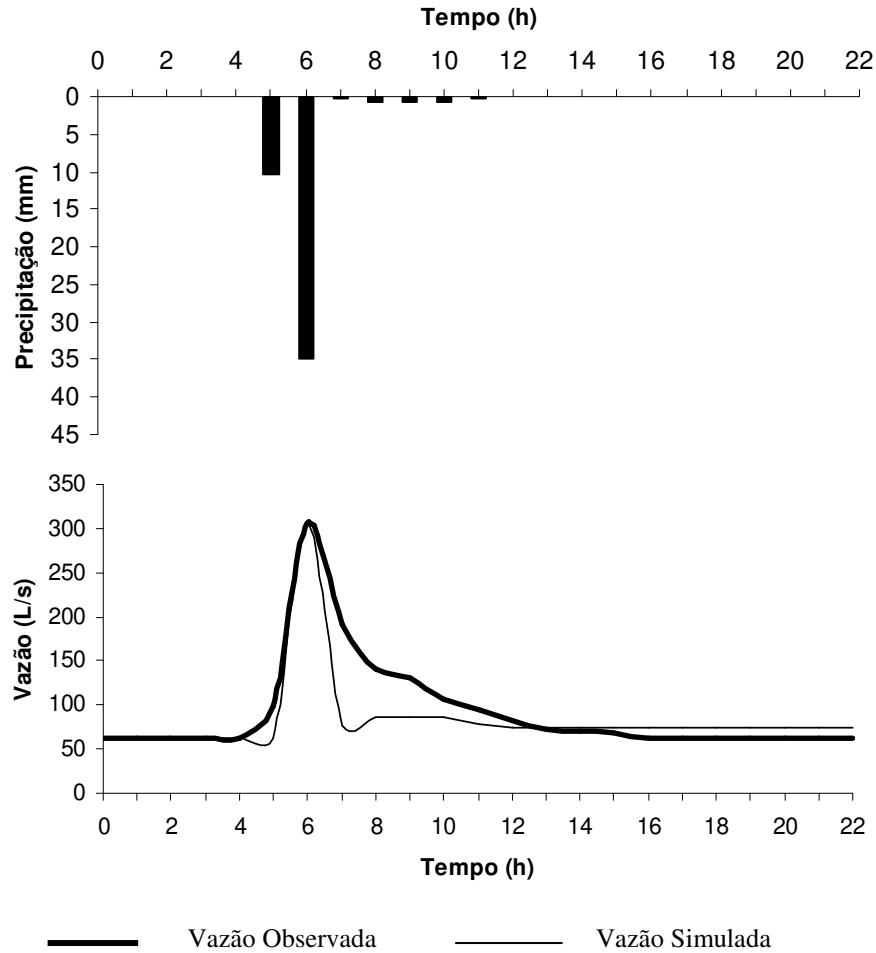


**Figura 110** – Vazão observada versus vazão simulada para os eventos de validação, considerando a hipótese H2, e modelo de regressão linear.

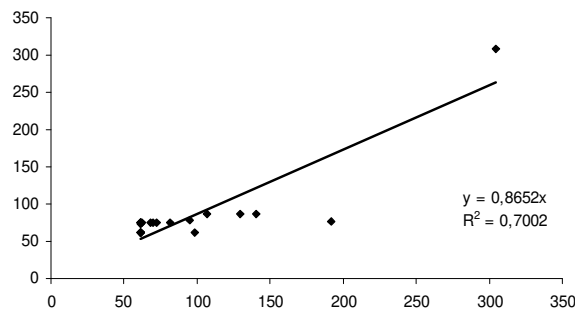


**Figura 111** – Volume escoado observado versus volume escoado simulado para os eventos de validação, considerando a hipótese H2 e modelo de regressão linear entre os valores.

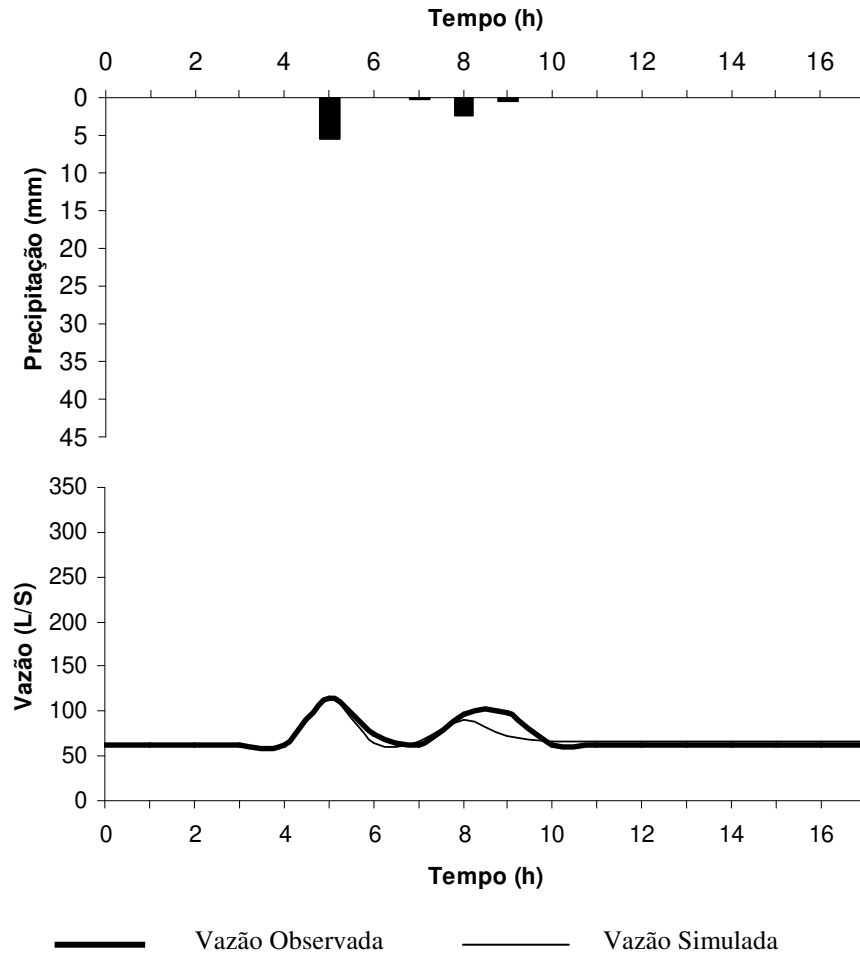
A seguir, cada evento é analisado isoladamente sendo que, os resultados obtidos são mostrados nas figuras 112, 114, 116, 118, 120, 122, 124, 126, 128, 130, onde podem ser observados os ietogramas e hidrogramas. A avaliação do resultado da simulação pela relação entre os dados observados e simulados de vazão foi efetuada a partir das figuras 113, 115, 117, 119, 121, 123, 125, 127, 129 e 131. Todos os ietogramas e hidrogramas são mostrados em uma única escala para efeitos de comparação. No capítulo apêndices (seção B.2.2), os mesmo são apresentados em escala diferenciada permitindo uma melhor visualização (figuras 167 a 176).



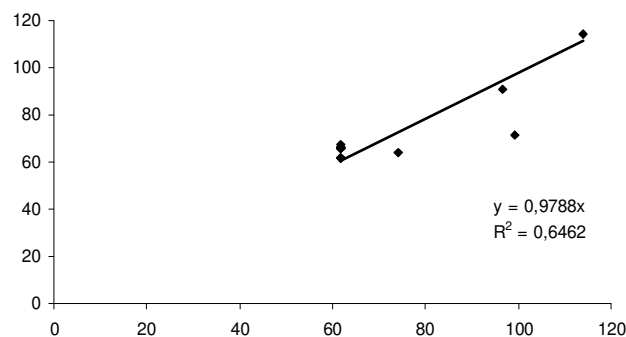
**Figura 112** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 1 (20/2/1999 a 21/2/1999) utilizado no processo de validação na aplicação do modelo TOPMODEL considerando a hipótese H2.



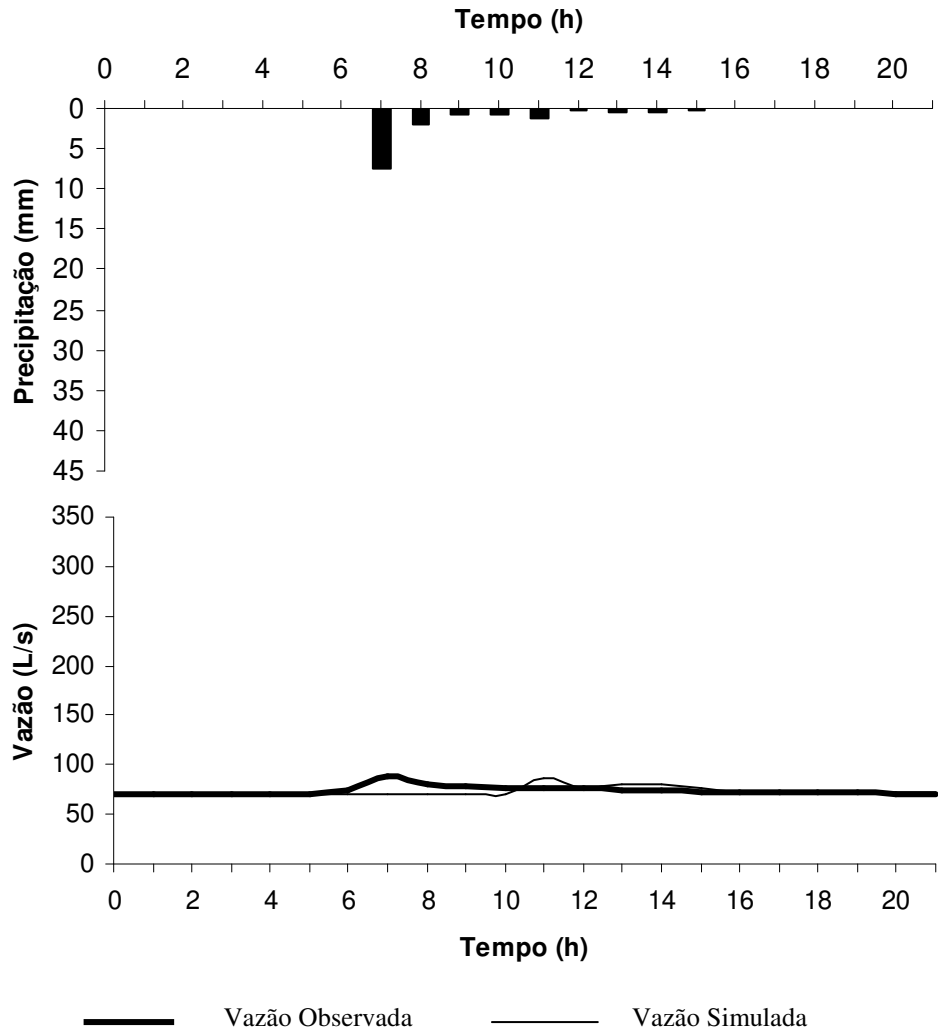
**Figura 113** – Vazão horária observada versus vazão horária simulada para o evento 1 de validação do TOPMODEL considerando H2 e respectivo modelo de regressão linear entre os valores.



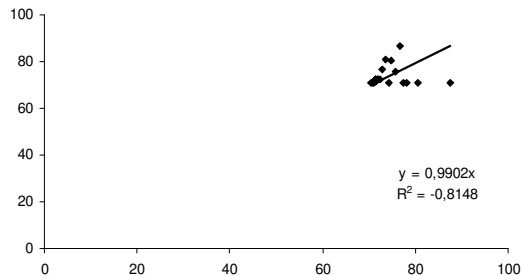
**Figura 114** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 2 (27/2/1999 a 28/2/1999) utilizado no processo de validação na aplicação do modelo TOPMODEL considerando a hipótese H2.



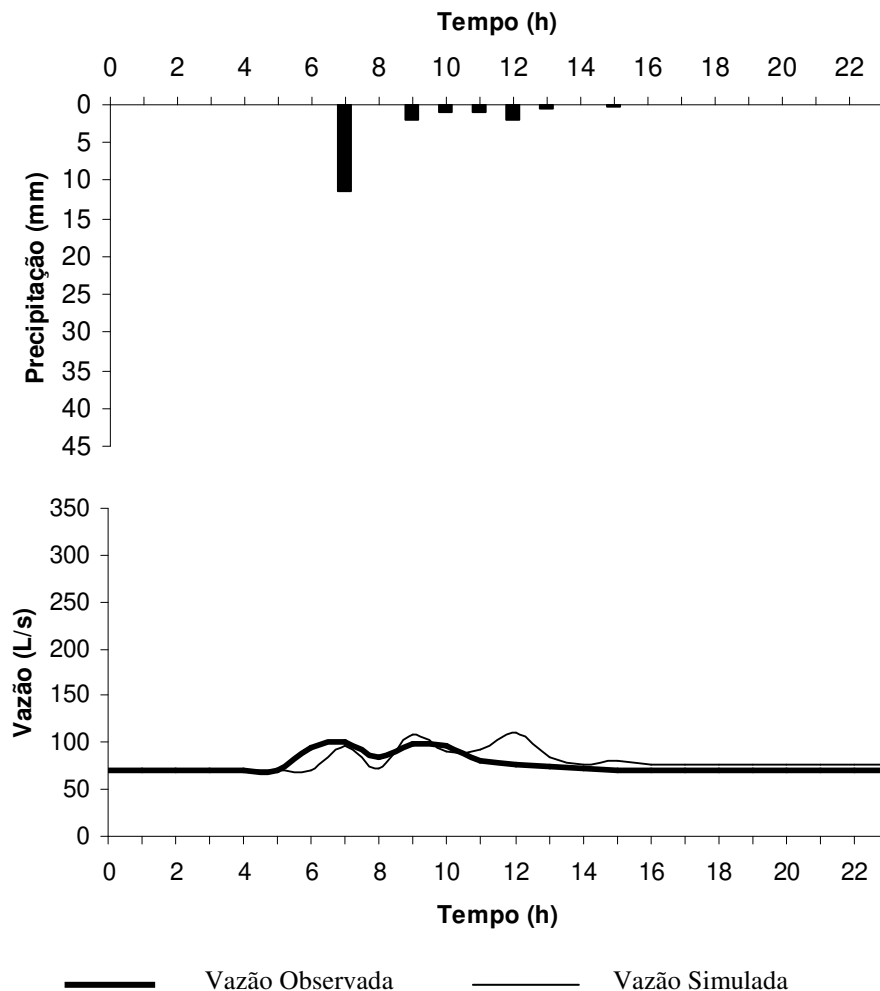
**Figura 115** – Vazão horária observada versus vazão horária simulada para o evento 2 de validação do TOPMODEL considerando a hipótese H2 e respectivo modelo de regressão linear entre os valores.



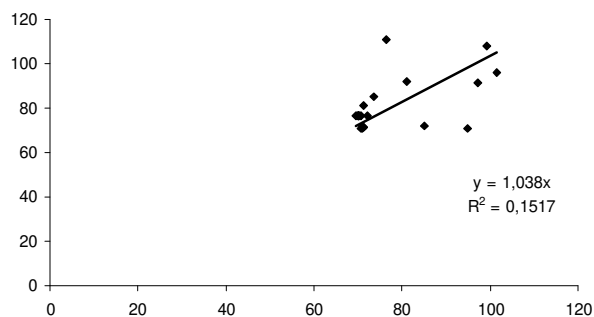
**Figura 116** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 3 (10/12/1999 a 11/12/1999) utilizado no processo de validação na aplicação do modelo TOPMODEL considerando a hipótese H2.



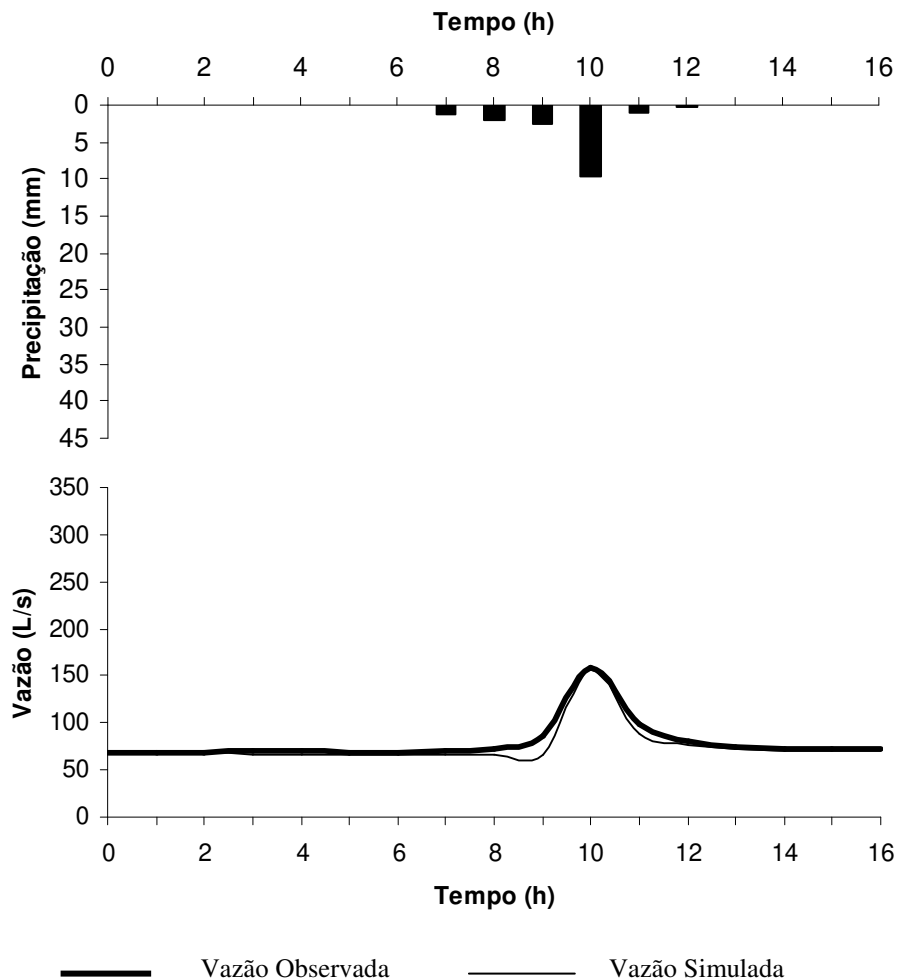
**Figura 117** – Vazão horária observada versus vazão horária simulada para o evento 3 de validação do TOPMODEL considerando H2 e respectivo modelo de regressão linear entre os valores.



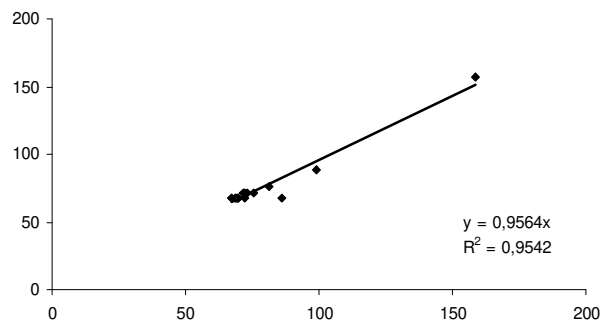
**Figura 118** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 4 (11/12/1999 a 12/12/1999) utilizado no processo de validação na aplicação do modelo TOPMODEL considerando a hipótese H2.



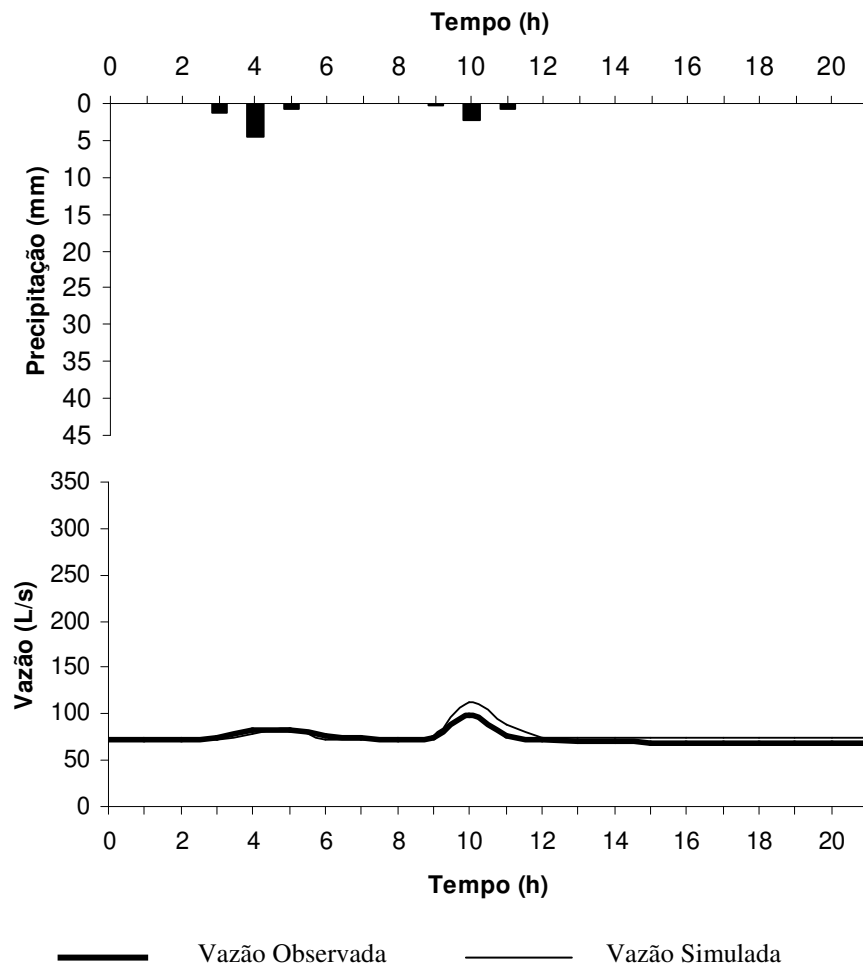
**Figura 119** – Vazão horária observada versus vazão horária simulada para o evento 4 de validação do TOPMODEL considerando a hipótese H2 e respectivo modelo de regressão linear entre os valores.



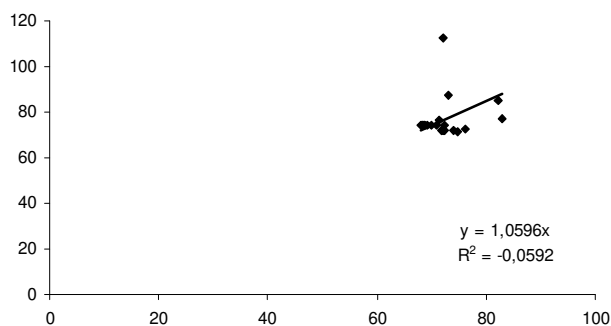
**Figura 120** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 5 (13/12/1999 a 14/12/1999) utilizado no processo de validação na aplicação do modelo TOPMODEL considerando a hipótese H2.



**Figura 121** – Vazão horária observada versus vazão horária simulada para o evento 5 de validação do TOPMODEL considerando a hipótese H2 e respectivo modelo de regressão linear entre os valores

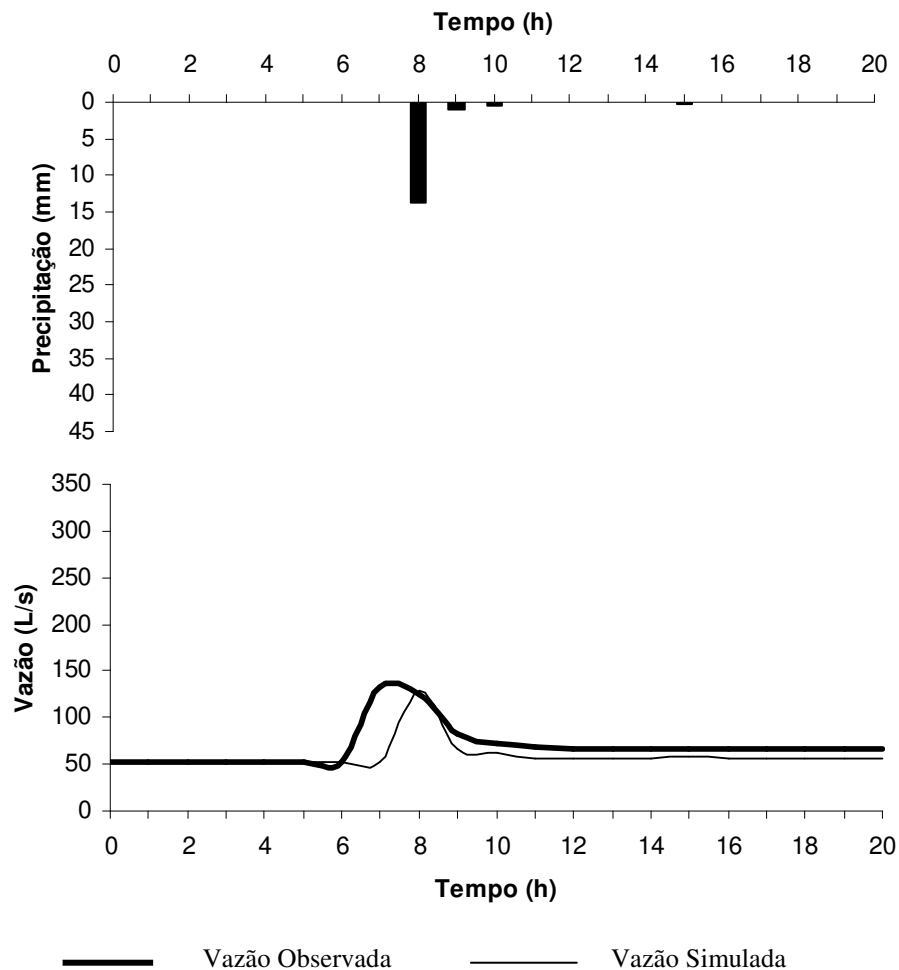


**Figura 122** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 6 (14/12/1999) utilizado no processo de validação na aplicação do modelo TOPMODEL considerando a hipótese H2.

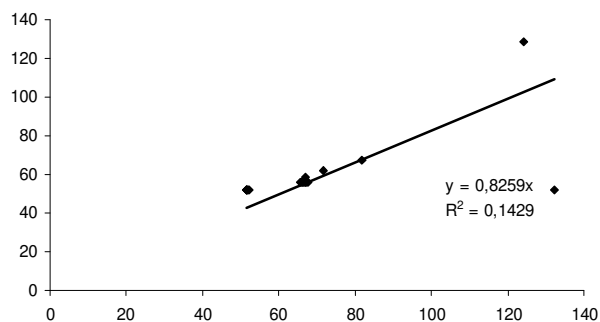


**Figura 123** – Vazão horária observada versus vazão horária simulada para o evento 6 de validação do TOPMODEL considerando a hipótese H2 e respectivo modelo de regressão linear entre os valores.

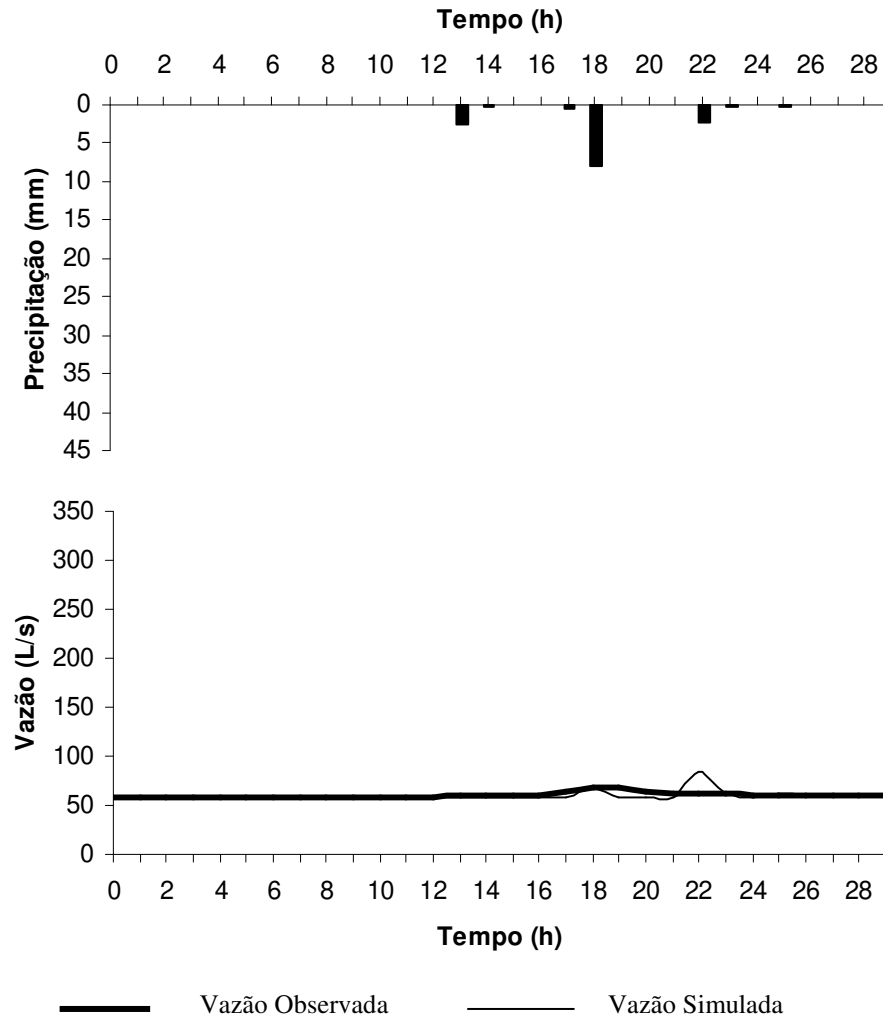




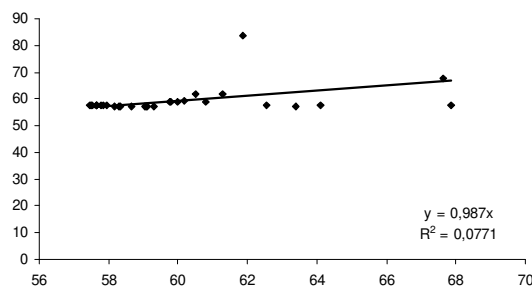
**Figura 124** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 7 (17/1/2000 a 18/1/2000) utilizado no processo de validação na aplicação do modelo TOPMODEL considerando a hipótese H2.



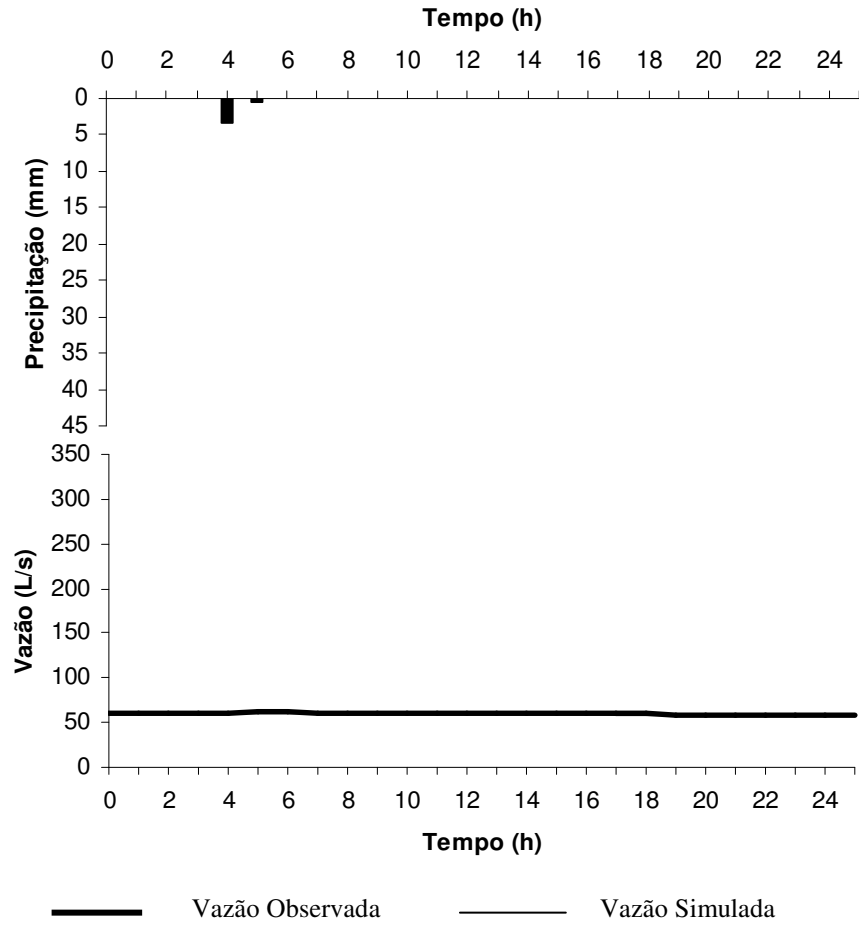
**Figura 125** – Vazão horária observada versus vazão horária simulada para o evento 7 de validação do TOPMODEL considerando a hipótese H2 e respectivo modelo de regressão linear entre os valores.



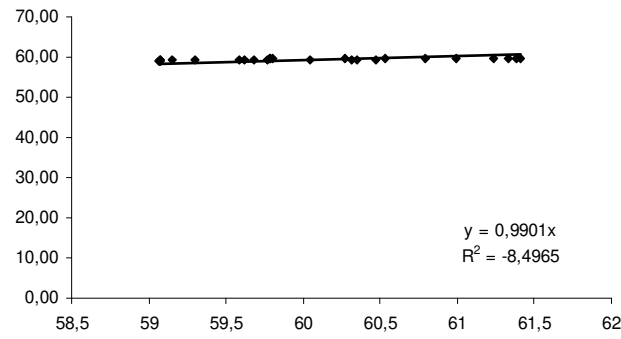
**Figura 126** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 8 (25/1/2000 a 26/1/2000) utilizado no processo de validação na aplicação do modelo TOPMODEL considerando a hipótese H2.



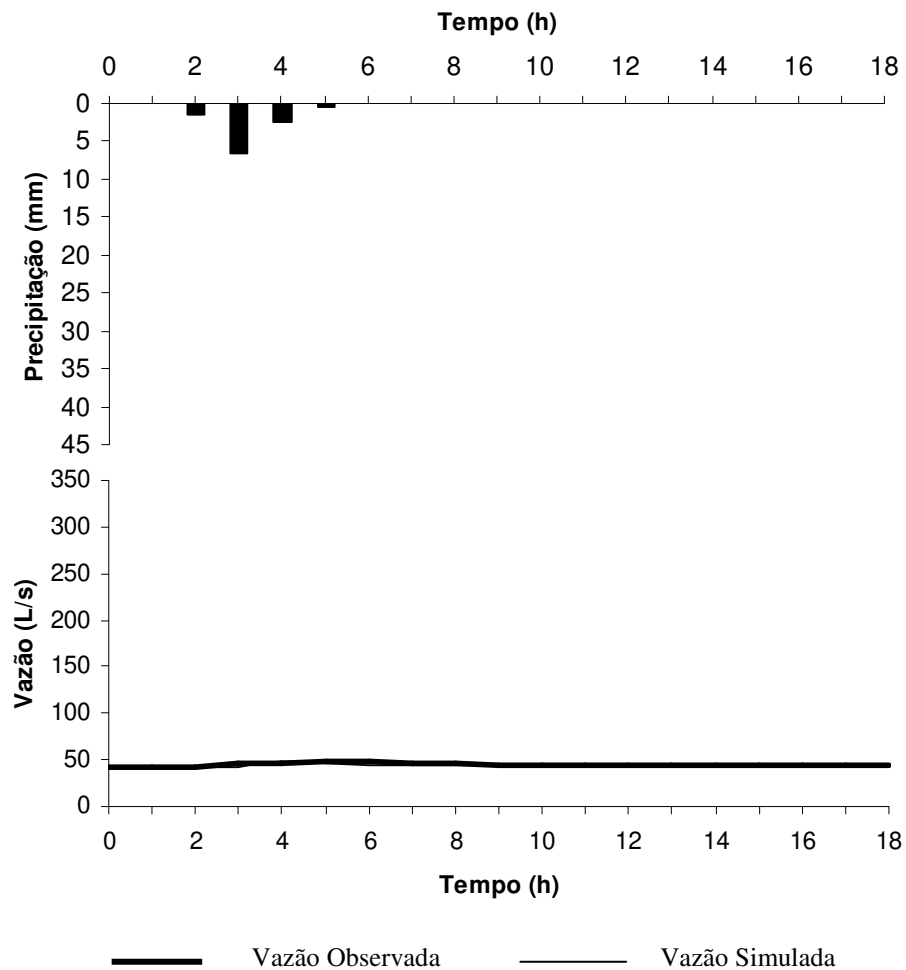
**Figura 127** – Vazão horária observada versus vazão horária simulada para o evento 8 de validação do TOPMODEL considerando a hipótese H2 e respectivo modelo de regressão linear entre os valores.



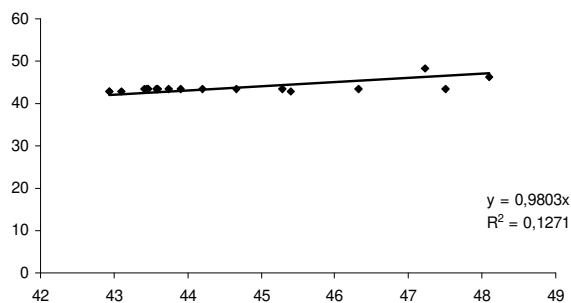
**Figura 128** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 9 (26/1/2000 a 27/1/2000) utilizado no processo de validação na aplicação do modelo TOPMODEL considerando a hipótese H2.



**Figura 129** – Vazão horária observada versus vazão horária simulada para o evento 9 de validação do TOPMODEL considerando a hipótese H2 e respectivo modelo de regressão linear entre os valores.



**Figura 130** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 10 (25/6/2000 a 26/6/2000) utilizado no processo de validação na aplicação do modelo TOPMODEL considerando a hipótese H2.



**Figura 131** – Vazão horária observada versus vazão horária simulada para o evento 10 de validação do TOPMODEL considerando a hipótese H2 e respectivo modelo de regressão linear entre os valores.

## **6. DISCUSSÃO**

### **6.1. Modelagem**

#### **6.1.1. Modelo TOPMODEL**

##### **6.1.1.1. Comparação com estudos realizados no Brasil**

FERREIRA (2004) estudou uma bacia rural (22km<sup>2</sup>) para a qual analisou 28 eventos do período de 1999 a 2000, os quais apresentaram variação de precipitação total de 7,4mm a 108,1mm e, picos de vazão de 500L/s a 23400L/s. COELHO (2003) trabalhou com duas bacias rurais (38km<sup>2</sup> e 67km<sup>2</sup>) analisando 5 eventos para cada uma delas, cujos valores de vazão de pico variaram de 860L/s a 25200L/s (período de dados: janeiro, fevereiro e novembro de 1976, novembro de 1993 e março de 1984) e de 11000L/s a 48000L/s (período de dados: novembro e dezembro de 1979; janeiro, abril e novembro de 1981), na primeira e segunda bacias, respectivamente. RANZINI (2002) estudando uma bacia florestada (0,56km<sup>2</sup>), apresentou resultado para 7 eventos do período de setembro de 1987 a agosto de 1989, cujas precipitações totais variaram de 16,8mm a 96,1mm e os valores de vazão de pico, de 49,8L/s a 356,9L/s. VARELLA e CAMPANA (2000) no estudo de uma bacia (114km<sup>2</sup>) com cobertura vegetal mista, apresentaram resultados para 5 eventos do ano de 1988, cujos valores de vazão de pico variaram de 4,8L/s a 26,9L/s. SCHULER (1998) trabalhou com dados de uma bacia (59km<sup>2</sup>) predominantemente coberta por pastagem, para a qual apresentou resultados de 20 eventos dos anos hídricos de 1992/1993 e 1993/1994, cujos valores de precipitação total foram de 21mm a 55mm e os de vazão de pico, de 2,1L/s a 10L/s. MINE e CLARKE (1996) estudaram uma bacia (42km<sup>2</sup>) com uma pequena parcela (8,4%) de cobertura rural, para a qual analisaram 9 eventos do ano de 1986 que apresentaram variação dos valores de vazão de pico entre 4.000L/s a 30.000L/s.

##### **6.1.1.2. Índice Topográfico**

Os valores de índice topográfico calculados para a bacia variaram entre 0 e 12, sendo que células com índice topográfico com valor 6 apresentaram maior valor de frequência relativa. No estudo de FERREIRA (2004), considerando células com tamanho de grid de 30m x 30m, os valores de índice topográfico variaram de 0 a 16, sendo que o maior valor de frequência relativa foi observado para valores de índice topográfico iguais a 7. Como pode-se

constatar, o valor de índice topográfico com maior frequência relativa na bacia estudada está muito próximo ao valor observado por FERREIRA (2004). Este fato indica que as condições de relevo das bacias são muito semelhantes. O valor máximo de índice topográfico no estudo da autora é superior, uma vez que a área da bacia analisada por FERREIRA (2004) é, aproximadamente, cinco vezes maior.

## **6.1.2. Simulações**

### **6.1.2.1. Aplicação do modelo TOPMODEL**

#### **6.1.2.1.1. Calibração do modelo**

##### **6.1.2.1.1.1. Eventos**

FERREIRA (2004) utilizou 12 eventos (42,8% do total) no processo de calibração; COELHO (2003) fez uso de 3 eventos (60% do total) para calibrar os parâmetros utilizados nas simulações de cada uma das bacias estudadas; RANZINI (2002) apresentou resultados de 7 eventos usados na calibração do modelo e SCHULER (1998), 20 eventos; VARELLA e CAMPANA (2000) utilizaram 5 eventos, MINE e CLARKE (1996), um único evento.

No estudo de FERREIRA (2004), a precipitação total dos eventos de calibração variou de 7,4mm a 83,9mm; as vazões máximas variaram de 1500L/s a 23400L/s; o volume escoado ficou entre  $33,7 \times 10^6$ L e  $763,5 \times 10^6$ L, e a variação do coeficiente de escoamento foi de 14,2% a 55,3%. Os eventos de calibração de COELHO (2003) apresentaram valores de vazão de pico variando de 11000L/s a 48000L/s. Em MINE e CLARKE (1996) o volume escoado do evento de calibração foi de  $305,8 \times 10^6$ L.

##### **6.1.2.1.1.2. Ajuste dos parâmetros**

Os valores dos parâmetros do modelo TOPMODEL encontrados na literatura foram resumidos e apresentados no quadro 2, a fim de simplificar a comparação entre os valores obtidos no presente estudo.

**Quadro 2** – Valores dos parâmetros  $m$ ,  $T_0$ ,  $CHV$ ,  $SR_{max}$  do modelo TOPMODEL utilizados por diferentes autores.

Autor (es)	Área da bacia (km <sup>2</sup> )	$m$ (m)	$T_0$ (m <sup>2</sup> h <sup>-1</sup> )	CHV (mh <sup>-1</sup> )	$SR_{max}$ (m)
FERREIRA (2004)	22	0,00315	2,0086	2000	0,1079
BUYTAERT et al. (2004)	2,58	0,0	0,0498	500	0,0
		a	a	a	a
		1,0	90,0171	2000	1,0
XAVIER <i>et al.</i> (2003)	–	0,23	54,5981	3600	0,20
COELHO (2003)	38	0,0225	2,2341	6984	0,0487
	67	0,1334	1,9017	8532	0,0987
RANZINI (2002)	0,56	0,05083	0,0498	5200	0,0032
		a	a		a
		0,4555	0,1785		0,0916
CAMPLING <i>et al.</i> (2002)	(1995)	0,066	2,792	1322,64	0,010
		a	a	a	a
		0,073	5,801	1996,58	0,024
	379	0,054	2,792	1910,61	0,025
		a	a	a	a
		0,069	5,801	3593,31	0,045
PETERS <i>et al.</i> (2001)	0,41	0,01	0,0009	1000	0,015
		a	a	a	a
		0,08	2,7183	5000	0,100
BEVEN e FREER (2001)	0,94	0,005	1,1052	1000	0,005
		a	a	a	a
		0,06	12980,958	5000	0,300
VARELLA e CAMPANA (2000)	114	0,10	6,0497	2500	0,050
		a	a		
		0,17	44,704		
SCANLON <i>et al.</i> (2000)	2,37	0,0401	–	–	0,15
SCHULER (1998)	59	0,0064	0,0602	7200	0,0202
		a	a		a
		0,4277	9,2073		0,1990
BRASINGTON e RICHARDS (1998)	(grid de 20m)	0,053	–	–	0,0048
	4,5	0,056			0,0036
	(grid de 40m)				

**Quadro 2 - Continuação**

SAULNIER <i>et al.</i> (1997b)	8,4	0,025	–	–	0,019
BLAZKOVA e BEVEN (1997)	4,75	0,016	2,19	3600	0,040
MINE e CLARKE (1996)	3,53	0,022	134,2898	3960	0,050
FRANCHINI <i>et al.</i> (1996)	840	1,4999	–	–	0,002

Analisando o quadro 2, considerando as bacias com áreas entre 2km<sup>2</sup> e 10km<sup>2</sup>, o valor do parâmetro  $m = 0,1\text{m}$  adotado foi igual ao valor máximo utilizado por BUYTAERT *et al.* (2004); 60% superior ao encontrado por SCALON *et al.* (2000); aproximadamente o dobro dos valores obtidos por BRASINGTON e RICHARDS (1998); 75% acima do valor estabelecido por SAULNIER *et al.* (1997); 84% superior ao valor obtido por BLAZKOVA e BEVEN (1997) e, 78% acima do utilizado por MINE e CLARKE (1996). Com relação às demais bacias estudadas na literatura citada, o parâmetro  $m$  apresentou valor 97% superior ao estabelecido por FERREIRA (2004); 56% inferior ao utilizado por XAVIER *et al.* (2003); 2,5% menor e 78% superior ao encontrado por COELHO (2003) para as bacias de 67km<sup>2</sup> e 38km<sup>2</sup>, respectivamente; o dobro do valor mínimo encontrado por RANZINI (2002) e por CAMPLING *et al.* (2002) para o ano de 1994; 20% maior que o valor máximo utilizado por PETERS *et al.* (2001); 40% superior ao máximo valor de BEVEN e FREER (2001); igual ao mínimo usado por VARELLA e CAMPANA (2000); 94% superior ao valor mínimo encontrado por SCHULER (1998) e, 93% inferior ao valor usado por FRANCHINI *et al.* (1996).

Procedendo como na análise do parâmetro  $m$ , o valor do parâmetro  $T_0 = 3,0042\text{m}^2\text{h}^{-1}$  está dentro da faixa de valores utilizada por BUYTAERT *et al.* (2004); 27% superior ao valor obtido por BLAZKOVA e BEVEN (1997) e, 98% inferior ao utilizado por MINE e CLARKE (1996). Com relação às demais bacias citadas, o parâmetro  $T_0$  apresentou valor 33% superior ao estabelecido por FERREIRA (2004); 94% inferior ao utilizado por XAVIER *et al.* (2003); 26% e 37% superior ao encontrado por COELHO (2003) para as bacias de 38km<sup>2</sup> e 67km<sup>2</sup>, respectivamente; 94% superior ao máximo encontrado por RANZINI (2002); 7% acima do valor mínimo estabelecido por CAMPLING *et al.* (2002); 9% maior que o valor máximo utilizado por PETERS *et al.* (2001); 63% superior ao mínimo valor de BEVEN e FREER (2001); aproximadamente 50% inferior ao mínimo usado por VARELLA e CAMPANA (2000); 98% superior ao valor mínimo encontrado por SCHULER (1998).



Quanto ao valor adotado do parâmetro CHV, este foi igual ao máximo utilizado por BUYTAERT *et al.* (2004); 44% inferior ao valor obtido por BLAZKOVA e BEVEN (1997) e, 49% abaixo do utilizado por MINE e CLARKE (1996). Com relação às demais bacias citadas, o parâmetro CHV foi o mesmo utilizado por FERREIRA (2004); 44% inferior ao utilizado por XAVIER *et al.* (2003); 71% e 77% inferior aos encontrados por COELHO (2003); 62% abaixo do valor utilizado por RANZINI (2002); 0,2% e 4% acima dos valores máximo e mínimo utilizados por CAMPLING *et al.* (2002) para os anos de 1995 e 1994, respectivamente; o dobro do valor mínimo usado por PETERS *et al.* (2001) e também por BEVEN e FREER (2001); 20% inferior ao usado por VARELLA e CAMPANA (2000); 72% inferior ao valor estabelecido por SCHULER (1998).

Para o valor do parâmetro  $SR_{max}$ , o valor adotado no presente estudo encontra-se dentro da faixa utilizada por BUYTAERT *et al.* (2004); 25% superior ao valor obtido por SCALON *et al.* (2000); 97% e 98% acima dos valores utilizados por BRASINGTON e RICHARDS (1998); 90% superior ao valor usado por SAULNIER *et al.* (1997); 80% acima do estabelecido por BLAZKOVA e BEVEN (1997) e, 75% superior ao utilizado por MINE e CLARKE (1996). Em relação às demais bacias citadas, o parâmetro  $SR_{max}$  foi 46% superior ao utilizado por FERREIRA (2004); igual ao usado por XAVIER *et al.* (2003); 76% e 51% superior aos encontrados por COELHO (2003); 54% acima do valor máximo utilizado por RANZINI (2002); 95% e 88% acima dos valores máximos estabelecidos por CAMPLING *et al.* (2002) para o ano de 1995 e 1994, respectivamente; o dobro do valor máximo usado por PETERS *et al.* (2001); está dentro da faixa de valores utilizados por BEVEN e FREER (2001); 75% acima do usado por VARELLA e CAMPANA (2000); apresentou aproximadamente igual ao valor máximo estabelecido por SCHULER (1998) e, 99% superior ao adotado por FRANCHINI *et al.* (1996).

O valor de  $SR_0$  para os eventos de calibração de FERREIRA (2004) variou de 0,00096m a 0,04751m, sendo os valores de eficiência estando entre 28% e 96%. Para BUYTAERT *et al.* (2004) a variação foi de 0,0m a 1,0m, sendo o valor máximo de eficiência igual a 77%. COELHO (2003) trabalhou com valor fixo de 0,002m para o parâmetro  $SR_0$ , e os resultados de eficiência para os eventos de calibração variaram de 61% a 81%. Em RANZINI (2002) a variação de  $SR_0$  foi de 0,01311m a 0,03717m e de eficiência, 75% a 86%. PETERS *et al.* (2001) realizaram seu estudo com o parâmetro  $SR_0$  dentro da faixa de 0,00m a 0,05m.

BEVEN e FREER (2001) utilizaram valores variando de 0,0m a 0,3m. VARELLA e CAMPANA (2000) utilizaram o valor de  $SR_0$  fixo em 0,002m. SCHULER (1998) obteve valores de  $SR_0$  0,0206m a 0,195m e valores de eficiência variando de 37% a 89%. SCALON *et al.* (2000) usaram um único valor,  $SR_0 = 0,0042m$ . MINE e CLARKE (1996) utilizaram o valor de  $SR_0$  igual a 0,0005m e a eficiência para o evento de calibração foi de 82%.

#### **6.1.2.1.1.3. Resultados**

No processo de calibração de FERREIRA (2004) a variação dos valores de vazão máxima observada e simulada foi de -22% a 58%, sendo o valor médio de 19,3% e, em módulo, 25,4%. Pode-se notar que estes valores são significativamente superiores aos encontrados no presente estudo. Considerando todos os eventos de calibração de FERREIRA (2004), em 75% deles o modelo subestimou os valores de vazão máxima.

Dos eventos analisados para a bacia em estudo, 60% apresentaram superestimação dos valores de volume escoado. A variação entre valores observados e simulados foi inferior a 5%. A variação média entre os volumes escoados observados e simulados foi de -0,78% e, em módulo, 2,5%. Os valores de variação entre volumes observados e simulados encontrados por FERREIRA (2004), para seus eventos de calibração, ficaram na faixa de -61% a 12%, sendo o valor médio de -18,4% e, em módulo, 21,7%, resultantes da superestimação de valores em 75% dos eventos. Para o evento de calibração de MINE e CLARKE (1996), o modelo apresentou superestimação do valor de volume escoado.

O coeficiente angular da reta (1,0031) indica a tendência do modelo superestimar os valores de vazão da bacia em estudo (figura 20), o mesmo não ocorrendo com os valores de volume escoado (coeficiente angular de 0,9878 - Figura 21). Para ambos os resultados, o coeficiente de determinação  $R^2$  foi superior a 90%. Este resultado difere do encontrado por FERREIRA (2004) uma vez que a autora constatou, em sua calibração, que o modelo tendeu a subestimar os valores de vazão máxima e superestimar, os de volume escoado.

Para os eventos de calibração o valor médio de eficiência de Nash e Sutcliffe foi de 80,2%, sendo que todos os eventos apresentaram valores de eficiência superiores a 60%. No processo de calibração para a bacia estudada os eventos 2 e 5 apresentaram valores de eficiência inferiores a 70%, o que coincide com os resultados de RANZINI (2002) e FERREIRA (2004), os quais indicam que o TOPMODEL apresenta melhores resultados de

desempenho para eventos isolados com precipitação total superior a 20mm e, estes eventos apresentam precipitações totais de 16,3mm e 7,9mm, respectivamente.

Na figura 22, nota-se que os valores observados e simulados para o evento 1 estão muito próximos (6,2L/s), sendo o valor de vazão máxima observada igual a 298,8L/s e o simulado, 292,6L/s. Os picos de vazão observada e simulada coincidiram no mesmo intervalo de tempo. A diferença entre os volumes escoado observado e simulado foi de  $0,18 \times 10^6$ L, que corresponde a uma lâmina (h') de água de 0,039mm sendo tal valor inferior à precisão dos instrumentos utilizados para a medida de chuva. A análise da figura 23 indica que, para este evento, o modelo fez uma pequena superestimativa dos valores de vazão representada pelo valor de 1,0043 do coeficiente angular da reta e que, o coeficiente de determinação  $R^2$  foi superior a 95%. Este evento ( $P_T = 23,9$ mm) é caracterizado pela ocorrência de praticamente uma chuva. Nos resultados dos eventos de calibração de FERREIRA (2004), foram encontrados três eventos com a mesma característica de distribuição da precipitação, porém com valores de precipitação totais inferiores ( $P_{T1} = 7,4$ mm,  $P_{T2} = 10,7$ mm,  $P_{T3} = 17,1$ mm). A autora encontrou defasagem na ocorrência dos picos de vazões observadas e simuladas e subestimação dos valores de pico, sendo que os valores de eficiência do modelo foram inferiores a 40%. Já RANZINI (2002), conseguiu simular evento semelhante ( $P_T = 24,9$ mm) com eficiência de 86%, sendo que não ocorreu atraso entre os picos de vazão simulada e observada e, o valor do pico de vazão foi subestimado. SCHULER (1998) simulou evento semelhante ( $P_T = 45$ mm) no qual houve coincidência entre as vazões de pico simulada e observada, sendo o valor de eficiência igual a 57%. As simulações para bacia maiores podem apresentar problemas de defasagem mais freqüentemente, em função dos valores maiores do tempo de concentração das bacias em relação ao intervalo de tempo de simulação.

A figura 24 apresenta os resultados obtidos para o evento 2, onde se pode notar que o modelo apresenta atraso do primeiro pico de vazão, mostrando superestimação, sendo o valor observado igual a 71,8L/s e o simulado, 72,4L/s. Quanto ao segundo pico, o modelo apresentou subestimação, sendo o valor observado igual a 85,0L/s e o simulado, 71,2L/s. Neste evento, a diferença entre os valores de volume escoado observado e simulado foi de  $0,01 \times 10^6$ L (lâmina de água na bacia de 0,002mm). Considerando todos os valores de vazão do evento, a figura 25 revela que o modelo apresentou tendência a superestimativa (coeficiente angular da reta igual superior a 1). O evento ( $P_T = 16,3$ mm) caracteriza-se pela ocorrência de

dois blocos de precipitação os quais geraram dois picos de vazão. RANZINI (2002), em sua calibração de eventos isolados, apresentou um evento ( $P_T = 42,5\text{mm}$ ) com estas características, para o qual a eficiência de simulação foi de 76% porém, o modelo só obteve resposta para o segundo pico de vazão, havendo coincidência de tempo entre o valor observado e simulado, bem como seus valores foram praticamente os mesmos. Já SCHULER (1998) na simulação de dois eventos ( $P_{T1} = 48\text{mm}$ ,  $P_{T2} = 36\text{mm}$ ) com características similares, conseguiu resultados melhores em um dos eventos, uma vez que o modelo respondeu aos dois picos de vazão, ocorrendo defasagem de tempo apenas no primeiro pico e, a eficiência foi de 69%. Em tal evento, o primeiro pico de vazão foi subestimado e o segundo, apresentou pequena superestimação. No outro evento, o modelo só apresentou resposta para o segundo pico de vazão, sendo a eficiência igual a 75% e o valor de pico subestimado.

Na figura 26, pode-se notar que os valores observados e simulados estão muito próximos, sendo o valor de vazão máxima observada igual a 89,3L/s e o simulado, 92,6L/s. Os picos de vazão observada e simulada coincidiram no mesmo intervalo de tempo. Os valores de volume escoado observado e simulado apresentaram diferença de  $0,03 \times 10^6\text{L}$  (lâmina de água na bacia de 0,006mm). A análise da figura 27, referente ao evento 3, indica que o modelo, tende a subestimar os valores de vazão, o que é indicado pelo valor de 0,99 do coeficiente angular da reta, sendo o coeficiente de determinação  $R^2$  superior a 83%. Este evento ( $P_T = 22,4\text{mm}$ ) caracteriza-se pela ocorrência de duas precipitações com maior lâmina d'água em um curto intervalo de tempo. Nos resultados dos eventos de calibração de FERREIRA (2004), foram encontrados dois eventos com a mesma característica de distribuição da precipitação, porém com valores de precipitação ( $P_{T1} = 29,5\text{mm}$ ,  $P_{T2} = 33,4\text{mm}$ ), sendo que no primeiro evento a simulação apresentou atraso na ocorrência pico de vazão e subestimação deste valor (eficiência de 48%); no segundo, ocorreram adiantamento e subestimação do pico de vazão simulada, sendo a eficiência igual a 83%. RANZINI (2002), em sua calibração de eventos isolados, apresentou dois eventos ( $P_{T1} = 38,8\text{mm}$ ,  $P_{T2} = 33,9\text{mm}$ ) com estas características, para os quais a eficiência de simulação foi de 78% e 75%, havendo coincidência entre os picos de vazão observada e simulada. SCHULER (1998) simulou três eventos ( $P_{T1} = 42\text{mm}$ ,  $P_{T2} = 46\text{mm}$ ,  $P_{T3} = 50\text{mm}$ ) com estas características, nos quais o modelo apresentou defasagem entre as vazões de pico observada e simulada e subestimação dos valores de pico, e valores da eficiência 73%, 81% e 58%.

A análise do evento 4 é feita a partir da figura 28 onde é notado que os valores observados e simulados estão próximos, sendo o valor de vazão máxima observada igual a 120,7L/s e o simulado, 119,5L/s. Não ocorreu defasagem de tempo entre os picos de vazão observada e simulada. Os valores de volume escoado observado e simulado apresentaram diferença de  $0,13 \times 10^6$ L (lâmina de água na bacia de 0,028mm). A figura 29 mostra que o modelo tende a superestimar os valores de vazão do evento 4, o que é indicado pelo valor de 1,02 do coeficiente angular da reta, sendo o coeficiente de determinação  $R^2$  superior a 91%. O evento 4 ( $P_T = 25,4$ mm) caracteriza-se pela ocorrência de um bloco de precipitações com intervalo de ocorrência de aproximadamente 1 hora, apresentando uma chuva de valor superior ao dobro das demais. Nos resultados dos eventos de calibração de FERREIRA (2004), foram encontrados dois eventos com a mesma característica de distribuição da precipitação ( $P_{T1} = 23,2$ mm,  $P_{T2} = 30,9$ mm), sendo que no primeiro evento a simulação apresentou coincidência na ocorrência dos picos de vazão simulada e observada, bem como valores muito próximos (eficiência de 95%); no segundo, ocorreu atraso do pico de vazão simulada e subestimação do valor de vazão máxima, eficiência resultante foi de 31%. RANZINI (2002) calibrando eventos isolados encontrou resultados distintos quanto ao comportamento do modelo em dois eventos ( $P_{T1} = 16,8$ mm,  $P_{T2} = 23,7$ mm) com características semelhantes a do evento em análise (evento 4). Os resultados do autor mostram eficiência de simulação foi de 83% e 77%, havendo coincidência entre os picos de vazão observada e simulada em ambos os eventos, porém o modelo apresentou superestimação no primeiro evento e, subestimação no segundo. SCHULER (1998) simulou quatro eventos semelhantes ( $P_{T1} = 21$ mm,  $P_{T2} = 25$ mm,  $P_{T3} = 51$ mm,  $P_{T4} = 24$ mm), para os quais o modelo respondeu diferentemente: no primeiro, não apresentou atrasos com relação ao pico de vazão observado e simulado, porém apresentou discrepância com relação à forma do hidrograma de vazão, o valor da vazão máxima foi subestimado e a eficiência ficou em 57%; no segundo e terceiro eventos, ocorreu atraso com relação à vazão de pico bem como subestimação de seu valor, sendo os valores de eficiência 55% e 89%, respectivamente; para o quarto evento o modelo também apresentou subestimação do valor de vazão de pico e, adiantamento da vazão de pico simulada, sendo o 68% valor da eficiência.

A figura 30 apresenta os hidrogramas do evento 5, onde se percebe que o modelo simulou o pico de vazão com pequeno atraso de tempo em relação ao pico de vazão

observada, sendo os valores observados e simulado de 56,8L/s e 56,1L/s, respectivamente. A diferença entre os valores de volume escoado observado e simulado foi de  $0,04 \times 10^6$ L (lâmina de água na bacia de 0,009mm). O modelo tende a subestimar os valores de vazão do evento 5, o que é indicado pelo valor de 0,99 do coeficiente angular da reta (figura 31), sendo o coeficiente de determinação  $R^2$  igual a 70%. Este evento apresenta características de distribuição da precipitação ao longo do tempo muito parecidas com as do evento 4, porém seu valor de precipitação total ( $P_T = 7,9$ mm) é 68,9% menor ao do evento 4. FERREIRA (2004) encontrou resultado semelhante quando calibrou evento com precipitação total de 30,9mm: atraso e subestimação do pico de vazão simulada, resultando em uma eficiência de 31%. SCHULER (1998) também obteve resultados semelhantes em dois eventos analisados ( $P_{T1} = 25$ mm,  $P_{T2} = 51$ mm) em seu estudo, onde ocorreu atraso com relação à vazão de pico bem como subestimação de seu valor, sendo os valores de eficiência 55% e 89%.

#### **6.1.2.1.2. Validação do modelo**

##### **6.1.2.1.2.1. Eventos**

FERREIRA (2004) utilizou 16 eventos (57,2% do total) no processo de validação; COELHO (2003) fez uso de 2 eventos (40% do total) para validar os parâmetros utilizados nas simulações de cada uma das bacias estudadas; MINE e CLARKE (1996) usaram 7 eventos (88% do total).

Em FERREIRA (2004) os eventos de validação apresentaram valores de precipitação total variando de 5,3mm a 108,1mm; as vazões de pico variaram de 500L/s a 8600L/s e o coeficiente de escoamento, de 7,3% a 45,2%. Os eventos de validação de COELHO (2003) apresentaram valores de vazão máxima variando de 860L/s a 23000L/s. Em MINE e CLARKE (1996) a variação dos volumes escoados foi de  $49,4 \times 10^6$ L a  $611,6 \times 10^6$ L.

##### **6.1.2.1.2.2. Ajuste dos parâmetros**

Analisando a tabela 7 verifica-se a ocorrência de valores negativos de eficiência em dois eventos (20% do total dos eventos de validação). Segundo COELHO (2003), “valores negativos de eficiência indicam que seria preferível adotar todas as vazões sempre iguais ao seu valor médio ao usar o modelo”.

O valor de  $SR_0$  para os eventos de validação de FERREIRA (2004) variou de 0,0012m a 0,068m, sendo os valores de eficiência estando entre -56,01 e 0,86. COELHO (2003) usou o valor fixo de 0,002m para o parâmetro  $SR_0$ , e os resultados de eficiência para os eventos de validação variaram de 57% a 82%. MINE e CLARKE (1996) utilizaram o valor de  $SR_0$  igual a 0,0005m para todos os eventos de validação, sendo que os valores de a eficiência variaram de 33% a 84%.

#### **6.1.2.1.2.3. Resultados**

No processo de validação de FERREIRA (2004), a variação entre os valores de vazão de pico observados e simulados foi de -400% a 50%, sendo o valor médio de -31%. Considerando todos os eventos de validação de FERREIRA (2004), em 75% deles o modelo apresentou subestimação dos valores de vazão de pico. Os resultados de MINE e CLARKE (1996) mostraram subestimação dos valores de vazão máxima em todos os eventos de validação.

A variação entre valores observados e simulados foi inferior a 10%. A variação média entre os volumes escoados observados e simulados foi de 1,6% e, em módulo, 3,3%. Em FERREIRA (2004), a variação entre os valores observados e simulados permaneceu na faixa de -180% a 30%, sendo o valor médio de -40%. No estudo da autora, em 68,8% dos eventos o modelo apresentou superestimação dos valores de escoamento. Em MINE e CLARKE (1996), o modelo apresentou superestimação dos valores de vazão máxima em todos os eventos de validação.

Na figura 34, o coeficiente angular da reta (0,9604) indica a tendência de o modelo subestimar os valores de vazão, o mesmo ocorrendo com os valores de volume escoado (coeficiente angular de 0,9687 - figura 35). Para os resultados de vazão, o coeficiente de determinação  $R^2$  foi de 68%; para os resultados de escoamento, foi de aproximadamente 96%. Este resultado difere do encontrado por FERREIRA (2004) uma vez que os resultados da autora indicam que o modelo tende a superestimar tanto os valores de vazão quanto os valores de volume escoado.

Observando a tabela 7 pode-se constatar que apenas três eventos obtiveram valores de eficiência acima de 70%, sendo o maior 92% (evento 5). Ao contrário do que ocorreu com os eventos de calibração, o evento de validação 2, cuja precipitação foi inferior a 20mm, foi o

único que apresentou valor de eficiência superior a 70%. Este fato discorda dos resultados de RANZINI (2002) e FERREIRA (2004) os quais indicam que o TOPMODEL apresenta melhores resultados de desempenho para eventos isolados, com precipitação total superior a 20mm.

Na Figura 36, nota-se que os valores observados e simulados estão muito próximos, sendo o valor de vazão máxima observada igual a 204,8L/s e o simulado, 307,2L/s, porém os picos de vazão observada e simulada não coincidiram no mesmo intervalo de tempo, o que pode ser atribuído a uma defasagem na escala de tempo da medida de precipitação. A diferença entre os valores de volume escoado observado e simulado foi de  $0,6 \times 10^6$ L, correspondendo a uma lâmina de água de 0,13mm. A análise da figura 37 indica que, para este evento, o modelo tende a subestimar os valores de vazão, o que pode ser verificado pelo valor de 0,8717 do coeficiente angular da reta, sendo o coeficiente de determinação  $R^2$  igual a 67%. O evento 1 ( $P_T = 76,2$ mm) é caracterizado pela ocorrência de duas chuvas mais significativas, em um curto espaço de tempo. FERREIRA (2004) simulou evento com características semelhantes, mas com valor de precipitação total 51,8% menor ( $P_T = 36,7$ mm) sendo que o valor de vazão máxima foi subestimado e ocorreu defasagem de tempo entre os picos observado e simulado, tendo 86% como valor de eficiência.

A figura 38 apresenta os resultados obtidos para o evento 2, onde se pode notar que o modelo conseguiu simular os dois picos de vazão, sendo praticamente imperceptível visualmente a diferença entre observado (113,9L/s) e simulado (113,1L/s) no primeiro pico. O segundo pico foi subestimado pelo modelo, sendo a diferença entre os valores observado e simulado igual a 27,9%. Neste evento, a diferença entre os valores de volume escoado observado e simulado foi de  $0,02 \times 10^6$ L (lâmina de água na bacia de 0,004mm). Considerando todos os valores de vazão do evento, a figura 39 revela que o modelo apresentou tendência à subestimação (coeficiente angular da reta igual a 0,9768) e que o coeficiente de determinação  $R^2$  foi de 63,6%. O evento 2 ( $P_T = 9,1$ mm) caracteriza-se pela ocorrência de duas chuvas principais as quais geram dois picos de vazão. No processo de validação de FERREIRA (2004), para um evento semelhante ( $P_T = 54,2$ mm), o modelo respondeu apenas para o segundo pico, apresentando subestimação de valor do pico e defasagem de tempo entre os picos observado e simulado, ficando o valor de eficiência em -9,41.



Na figura 40, pode-se notar que o modelo não conseguiu simular satisfatoriamente o evento 3, sendo que picos de vazão observada e simulada não coincidiram, o que pode ser devido à defasagem na escala de tempo da medida de precipitação, o que também foi constatado no evento 1. O valor de vazão máxima observada igual a 87,5L/s e o simulado, 86,9L/s. O evento apresentou diferença de  $0,09 \times 10^6$ L (lâmina de água na bacia de 0,02mm) entre os valores de volume escoado observado e simulado. A análise da figura 41 indica que o modelo tende a superestimar os valores de vazão, o que é indicado pelo valor de 1,0122 do coeficiente angular da reta; o coeficiente de determinação  $R^2$  apresentou valor negativo. Este evento ( $P_T = 16,5$ mm) tem como característica a ocorrência de um bloco de chuvas com pequeno intervalo de tempo entre elas e uma chuva de maior lâmina. FERREIRA (2004) apresenta evento semelhante ( $P_T = 47,7$ mm) no qual a vazão de pico foi subestimada e ocorreu defasagem de tempo entre os picos observado e simulado, com eficiência de simulação de 86%.

A análise do evento 4 é feita a partir da figura 42 onde é notado que a simulação não apresentou o mesmo comportamento da observação. Na primeira, foram registrados quatro picos de vazão e na segunda, apenas dois. O valor de vazão máxima observada foi igual a 101,5L/s e o simulado, 98,8L/s e a diferença entre valor observado e simulado para o segundo pico de vazão foi de 3,3%. A diferença entre o volume escoado observado foi de  $0,2 \times 10^6$ L (lâmina de água na bacia de 0,04mm). A figura 43 mostra que o modelo tende a superestimar os valores de vazão do evento 4, o que é indicado pelo valor de 1,0192 do coeficiente angular da reta; o valor do coeficiente de determinação  $R^2$  foi negativo. O evento 4 ( $P_T = 23,4$ mm) é caracterizado por duas chuvas principais que ocasionam dois picos de vazão.

A figura 44 apresenta os hidrogramas do evento 5, onde se percebe que não ocorreu defasagem de tempo em relação aos picos de vazão observada e simulada, sendo seus valores iguais a 101,5L/s e 98,8L/s, respectivamente. A diferença entre os valores de volume escoado observado e simulado foi de  $0,2 \times 10^6$ L (lâmina de água na bacia de 0,04mm). O modelo tende a subestimar os valores de vazão do evento 5, o que é indicado pelo valor de 0,9567 do coeficiente angular da reta (figura 45), sendo o coeficiente de determinação  $R^2$  igual a 94%. Este evento ( $P_T = 21,1$ mm) é composto por dois blocos de precipitação sendo que apenas o segundo apresentou precipitação que gerou pico de vazão. FERREIRA (2004) simulou evento

( $P_T = 57,9\text{mm}$ ) com características semelhantes cujo resultado apresenta subestimação do valor de vazão de pico bem como atraso em sua ocorrência; a eficiência foi de 72%.

A figura 46 mostra que o modelo conseguiu simular sem atraso os dois picos de vazão do evento 6. O valor de vazão máxima observada foi igual a 98,3/s e o simulado, 98,8L/s. A diferença entre os volumes escoado observado e simulado foi de  $0,23 \times 10^6\text{L}$  (lâmina de água na bacia de 0,05mm). A figura 47 mostra que o modelo tende a superestimar os valores de vazão do evento, o que é indicado pelo valor de do coeficiente angular da reta superior a 1. Este evento apresenta as mesmas características do evento 5, porém com precipitação total 49% inferior. O modelo mostrou comportamento distinto entre os eventos 6 e 5.

O evento 7 é ilustrado pela figura 48, onde se percebe que os valores observados e simulados estão próximos (6,1L/s de diferença), sendo o valor de vazão máxima observada igual a 132,3L/s e o simulado, 138,4L/s, porém os picos de vazão observada e simulada não coincidiram no mesmo intervalo de tempo, o que, como dito anteriormente, pode ser atribuído a uma defasagem na escala de tempo da medida de precipitação. Os valores de volume escoado observado e simulado apresentaram diferença de  $0,45 \times 10^6\text{L}$  (lâmina de água na bacia de 0,10mm). A análise da figura 49 indica que, para este evento, o modelo tende a subestimar os valores de vazão, o que pode ser verificado pelo valor de 0,8821 do coeficiente angular da reta, porém o coeficiente de determinação  $R^2$  foi baixo (27%). O evento 7 ( $P_T = 19,6\text{mm}$ ) tem como característica a ocorrência de uma única chuva principal. FERREIRA (2004) apresenta dois eventos ( $P_{T1} = 6,7\text{mm}$ ,  $P_{T2} = 5,3\text{mm}$ ) de validação semelhantes ao evento 7 sendo que para ambos o modelo apresentou subestimação do valor de vazão de pico. No primeiro evento da autora, ocorreu defasagem e no segundo, coincidência de tempo entre vazões de pico observada e simulada, sendo os valores de eficiência de 70% e 47%, respectivamente.

A figura 50 assinala que a resposta da vazão simulada à ocorrência de precipitação foi diferente a da vazão observada para o evento 8. O comportamento da vazão observada apresenta um único pico enquanto que, o da simulada, três. O valor de vazão máxima observada foi igual a 67,6L/s e o simulado, 71,3L/s. A diferença entre o volume escoado observado e simulado foi de  $0,11 \times 10^6\text{L}$  (lâmina de água na bacia de 0,02mm). A figura 51 mostra que a tendência do modelo foi subestimar os valores de vazão do evento 8, o que é indicado pelo valor de 0,9823 do coeficiente angular da reta, sendo o coeficiente de

determinação  $R^2$  igual a 13%. Este evento ( $P_T = 17,3\text{mm}$ ) tem como característica três blocos de precipitação sendo que apenas um gerou pico de vazão.

A figura 52 apresenta os hidrogramas do evento 9, que é visualizado com mais detalhes na figura 145, na qual se percebe que ocorreu defasagem de tempo em relação aos picos de vazão observada e simulada, sendo seus valores iguais a 61,4L/s e 62,7L/s, respectivamente. A diferença entre o volume escoado observado e o simulado foi de  $0,002 \times 10^6\text{L}$  (lâmina de água na bacia de 0,0004mm). Para este evento, o modelo tendeu à subestimação dos valores de vazão, verificado pelo valor de 0,9994 do coeficiente angular da reta (figura 53), além de apresentar coeficiente de determinação  $R^2$  igual a 12%. O evento 9 apresenta características semelhantes às do evento 7, porém com valor de precipitação total 81% menor, sendo que o comportamento do modelo foi o mesmo para ambos os eventos.

O evento 10 é ilustrado na figura 54 e melhor visualizado na figura 146, que mostra a diferença de comportamento entre os valores observados e simulados, ocorrendo defasagem de tempo em relação aos picos de vazão observada e simulada, sendo seus valores 48,1L/s e 47,0L/s, respectivamente. A diferença entre os valores de volume escoado observado e simulado foi de  $0,07 \times 10^6\text{L}$  (lâmina de água na bacia de 0,02mm). A tendência do modelo para este evento foi de subestimar os valores de vazão, salientado pelo valor de 0,9789 do coeficiente angular da reta (figura 55); o coeficiente de determinação  $R^2$  foi negativo. O evento 10 apresenta características semelhantes as do evento 3, mas com valor de precipitação total 29% inferior. Ambos os eventos apresentaram subestimação do valor de vazão de pico e defasagem de tempo, porém a tendência geral do modelo para o evento 10 foi contrária à obtida para o evento 3.

### **6.1.2.2. Aplicação do modelo TOPMODEL em conjunto a um modelo de interceptação vegetal**

#### **6.1.2.2.1.1. Índice de Área Foliar**

Os valores de IAF na bacia variaram de 0,23 a 2,86, considerando um período de 12 meses. O valor médio estimado foi de 1,87. No estudo de CASTLHO (2000), o IAF médio observado foi de 1,95, ressaltando que se tratava de uma pequena parcela experimental e o período de medidas foi inferior a 12 meses.

#### **6.1.2.2.1.2. Eventos de calibração**

##### **6.1.2.2.1.2.1. Interceptação Vegetal**

Os valores de precipitação interceptada resultantes da aplicação do modelo de CASTILHO (2000) variaram de 3,6mm (evento 3) a 11,6mm (evento 2), sendo o valor médio de 8,7mm.

##### **6.1.2.2.1.2.2. Escoamento pelo colmo**

Os valores de escoamento pelo colmo obtidos com a aplicação do modelo adotado variaram de 3,4mm (evento 5) a 5,2mm (evento 4), com valor médio de 4,6mm. No estudo de VIEIRA (1982), os valores médios de escoamento pelo colmo variaram de 0,1mm a 12,2mm.

##### **6.1.2.2.1.2.3. Precipitação que chega ao solo**

O valor de precipitação que atinge o solo (PS) variou de 7,7mm (evento 5) a 18,9mm (evento 4), apresentando valor médio de 15,1mm. Já o coeficiente  $\phi$ , utilizado para distribuir a precipitação interceptada uniformemente ao longo do tempo, variou de 0,74 (evento 4) a 0,98 (evento 5), com valor médio de 0,82.

##### **6.1.2.2.1.2.4. Ajuste dos parâmetros**

###### **6.1.2.2.1.2.4.1. Ajuste dos parâmetros considerando a hipótese H1 de distribuição da precipitação interceptada**

Com exceção da transmissividade lateral saturada ( $T_0$ ), os demais parâmetros do modelo permaneceram com o mesmo valor daqueles obtidos no processo de calibração do modelo TOPMODEL aplicado isoladamente. O valor de  $T_0$  quando da aplicação do TOPMODEL associado ao modelo de interceptação vegetal, apresentou valor 18% inferior e, também se encaixando na faixa de valores observados na literatura.

Quanto ao parâmetro déficit inicial de umidade na zona radicular ( $S_0$ ), os valores obtidos variaram de 0,001m (evento 1) a 0,009m (evento 3), sendo o valor médio igual a 0,00626m. Quando se realizou o processo de calibração do TOPMODEL isoladamente, essa variação foi de 0,003m (evento 1) a 0,0108m (evento 3), o que resultou em valor médio de 0,00676m.

O processo de calibração desta etapa do trabalho apresentou valores de eficiência variando de 35% (evento 5) a 97% (evento1), sendo o valor médio de 75,8%.

#### **6.1.2.2.1.2.4.2. Ajuste dos parâmetros considerando a hipótese H2 de distribuição da precipitação interceptada**

Quando se considerou a hipótese H2 de distribuição da precipitação interceptada, os valores do parâmetro déficit inicial de umidade na zona radicular ( $S_0$ ) variaram de 0,0001m (evento 3) a 0,0076m (evento 2), sendo o valor médio igual a 0,00438m. Os valores resultantes de eficiência variaram de 33% (evento 5) a 97% (evento1), sendo o valor médio de 79,2%.

Comparativamente, o resultado da calibração dos eventos considerando a hipótese H2 foi melhor, apresentando valor médio de eficiência 43% superior ao obtido considerando hipótese H1. Em relação ao uso do modelo TOPMODEL isoladamente, os valores médios de eficiência foram inferiores 5,6% e 1,2%, considerando as hipóteses H1 e H2 respectivamente.

#### **6.1.2.2.1.2.5. Resultados**

##### **6.1.2.2.1.2.5.1. Resultados considerando a hipótese H1 de distribuição da precipitação interceptada**

Os valores simulados de vazão máxima variaram de 58,6L/s (evento 5) a 298,6L/s (evento 1); o volume escoado simulado variou de  $2,92 \times 10^6$ L (evento 3) a  $5,21 \times 10^6$ L (evento 2); o coeficiente de escoamento simulado variou de 3,7% a (evento3) a 8,4% (evento 2), apresentando valor médio de 5,6%.

Os valores de coeficiente de escoamento simulados nesta etapa foram superiores (35, 8% em média) aos valores observados. Isto ocorreu em decorrência ao fato de estar chegando menos água no solo. A variação entre o volume escoado observado e simulado foi inferior a 10% em todos os eventos de calibração, apresentando média de 0,18% e, 2,3% em módulo. Na maioria dos eventos (60%) os valores simulados foram subestimados. No caso da aplicação do TOPMODEL isoladamente, este fato também foi verificado.

A variação entre valores de vazão máxima observada e simulada foi, em módulo, inferior a 10% em todos os eventos de calibração, sendo o valor médio de -1,2% ou, 2,7% em módulo.

Comparando todos os valores de vazão dos cinco eventos de calibração com os valores observados, o modelo TOPMODEL apresentou tendência à subestimação destes valores, o que é indicado pelo coeficiente angular da reta da figura 58. Quanto aos volumes escoados, considerando todos os eventos, a tendência do modelo é subestimá-los.

Individualmente, o comportamento dos hidrogramas dos eventos simulados com o TOPMODEL em conjunto ao modelo de interceptação vegetal foi comparado ao apresentado quando do uso do TOPMODEL isoladamente. Segue as observações feitas a respeito:

- Os hidrogramas referentes ao evento 1 foram semelhantes nos dois casos, não apresentando defasagem de tempo em relação à ocorrência da vazão de pico. A tendência do modelo foi de subestimar os valores de vazão.
- Com a utilização do TOPMODEL associado ao modelo de interceptação, ocorreu melhora significativa na simulação do hidrograma referente ao evento 2, uma vez que o modelo apresentou resposta para os dois picos de vazão observados, sem defasagem de tempo, o que não foi conseguido com a simulação usando o TOPMODEL isoladamente. O modelo apresentou tendência de subestimar os valores de vazão.
- Os hidrogramas referentes ao evento 3 foram semelhantes nos dois casos, não apresentando defasagem de tempo em relação à ocorrência da vazão de pico. A tendência do modelo também foi de subestimar os valores de vazão.
- Assim como para os eventos 1 e 3, os hidrogramas referentes ao evento 4 foram semelhantes nos dois casos, não apresentando defasagem de tempo em relação à ocorrência da vazão de pico. Entretanto, a tendência do modelo também foi de superestimar os valores de vazão.
- Com relação ao evento 5, quando se considerou a interceptação vegetal, o modelo simulou a vazão de pico com defasagem de tempo (atraso), o que pode ser atribuído à diferença da escala de tempo das medidas de chuva do posto em relação precipitação realmente na bacia. A tendência do modelo foi subestimar os valores de vazão nos casos da hipótese H1 e H2 e, superestimar quando do uso do TOPMODEL isoladamente.

#### **6.1.2.2.1.2.5.2. Resultados considerando a hipótese H2 de distribuição da precipitação interceptada**

Os valores simulados de vazão máxima variaram de 51,8L/s (evento 5) a 292,4L/s (evento 1); o volume escoado simulado variou de  $2,40 \times 10^6$ L (evento 3) a  $5,221 \times 10^6$ L (evento 2); o coeficiente de escoamento simulado variou de 3,6% a (evento3) a 8,4% (evento 2), apresentando valor médio de 5,6%.

A variação entre valores de vazão máxima observada e simulada foi, em módulo, inferior a 10% em todos os eventos de calibração, sendo o valor médio de 2,6% ou, 4,3% em módulo.

Como afirmado anteriormente, os valores de coeficiente de escoamento simulados foram superiores aos valores observados devido à correção da quantidade de água que chega ao solo. A variação entre o volume escoado observado e simulado foi inferior a 10% em todos os eventos de calibração, apresentando média de 0,5% e, 2,8% em módulo. Ao contrário do constatado quando da consideração da hipótese H1, para a maioria dos eventos (60%), os valores simulados foram superestimados.

Comparando todos os valores de vazão horária simulada dos cinco eventos de calibração com os valores horários observados, o modelo apresentou tendência à subestimação destes valores, o que também foi verificado quando do uso da hipótese H1 e do TOPMODEL isoladamente. Quanto aos volumes escoados, considerando todos os eventos, a tendência do modelo é subestimá-los, fato também observado quando da utilização da hipótese H1.

Como realizado anteriormente, o comportamento dos hidrogramas de cada evento simulado com o TOPMODEL em conjunto ao modelo de interceptação vegetal foi comparado ao apresentado quando do uso do TOPMODEL isoladamente. Segue as observações feitas a respeito:

- Os hidrogramas referentes ao evento 1 foram semelhantes nos dois casos e também quando se considerou a hipótese H1, não apresentando defasagem de tempo em relação à ocorrência da vazão de pico. A tendência do modelo foi de subestimar os valores de vazão em todos os casos.
- Com a utilização do TOPMODEL associado ao modelo de interceptação, ocorreu melhora significativa na simulação do hidrograma referente ao evento 2, uma vez que o modelo apresentou resposta para os dois picos de vazão observados, sem

defasagem de tempo, assim como com o uso da hipótese H1. Porém, o modelo apresentou tendência de superestimar os valores de vazão.

- Os hidrogramas referentes ao evento 3 foram semelhantes nos dois casos assim como quando foi considerada a hipótese H1, não apresentando defasagem de tempo em relação à ocorrência da vazão de pico. A tendência do modelo também foi de subestimar os valores de vazão em todos os casos.
- Assim como para os eventos 1 e 3, os hidrogramas referentes ao evento 4 foram semelhantes nos dois casos, não apresentando defasagem de tempo em relação à ocorrência da vazão de pico. Entretanto, a tendência do modelo também foi de superestimar os valores de vazão.
- As observações realizadas para o evento 5 considerando a hipótese H1 são válidas para a hipótese H2.

#### **6.1.2.2.1.3. Eventos de validação**

##### **6.1.2.2.1.3.1. Interceptação Vegetal**

Os valores de precipitação interceptada resultantes da aplicação do modelo de CASTILHO (2000) nos eventos de validação variaram de 1,6mm (evento 9) a 35,1mm (evento 4), sendo o valor médio de 9,3mm.

##### **6.1.2.2.1.3.2. escoamento pelo colmo**

Os valores de escoamento pelo colmo obtidos nos eventos de validação variaram de 1,6mm (evento 9) a 6,9mm (evento 1), com valor médio de 4,4mm.

##### **6.1.2.2.1.3.3. Precipitação que chega ao solo**

Os valores de precipitação que atinge o solo ( $P_s$ ) variaram de 1,6mm (evento 9) a 48,0mm (evento 1), apresentando valor médio de 15,8mm. Já o coeficiente  $\phi$ , variou de 0,42 (evento 9) a 0,96 (evento 10), com valor médio de 0,79.



#### **6.1.2.2.1.3.4. Ajuste dos parâmetros**

##### **6.1.2.2.1.3.4.1. Ajuste dos parâmetros considerando a hipótese H1 de distribuição da precipitação interceptada**

Nesta fase, o único ajuste necessário refere-se ao parâmetro déficit inicial de umidade na zona radicular ( $S_0$ ). Os valores obtidos variaram de 0,001m (evento 2) a 0,02940m (evento 1), sendo o valor médio igual a 0,010680m. Quando se realizou o processo de validação do TOPMODEL isoladamente, essa variação foi de 0,001m (evento 7) a 0,052m (evento 1), o que resultou em valor médio de 0,012388m.

O processo de validação desta etapa do trabalho apresentou valores de eficiência variando de -92% (evento 3) a 92% (evento5), sendo o valor médio de 24%. Aplicando o TOPMODEL isoladamente, a variação dos valores de eficiência foi de -45% a 92%, sendo o valor médio de 5%. Assim, nota-se uma melhora significativa (87,5%) nas eficiências das simulações dos eventos de validação quando se considera a precipitação interceptada.

##### **6.1.2.2.1.3.4.2. Ajuste dos parâmetros considerando a hipótese H2 de distribuição da precipitação interceptada**

Quando se considerou a hipótese H2 de distribuição da precipitação interceptada, os valores do parâmetro déficit inicial de umidade na zona radicular ( $S_0$ ) variaram de 0,0001m (evento 2) a 0,028m (evento 1), sendo o valor médio igual a 0,010037m. Os valores resultantes de eficiência variaram de -0,009% (evento 3) a 93% (evento5), sendo o valor médio de 33%.

Comparativamente, o resultado da validação dos eventos considerando a hipótese H2 foi melhor, apresentando valor médio de eficiência 27,3% superior ao obtido considerando a hipótese H1. Em relação ao uso do modelo TOPMODEL isoladamente, os valores médios de eficiência foram superiores 79,2% e 84,8%, considerando as hipóteses H1 e H2 respectivamente.

### **6.1.2.2.1.3.5. Resultados**

#### **6.1.2.2.1.3.5.1. Resultados considerando a hipótese H1 de distribuição da precipitação interceptada**

Os valores simulados de vazão máxima variaram de 48,2L/s (evento 10) a 302,4L/s (evento 1); o volume escoado simulado variou de  $2,99 \times 10^6$ L (evento 10) a  $6,80 \times 10^6$ L (evento 4); o coeficiente de escoamento simulado variou de 3,0% a (evento 1) a 75,6% (evento 9), apresentando valor médio de 14,8%.

A variação entre os valores de vazão máxima observada e simulada foi inferior a 20% em todos os eventos, apresentando valor médio de -3,1% ou, em módulo, 3,9%. Para a maioria dos eventos (70%), a vazão máxima foi superestimada. Este fato também foi notado quando se aplicou o TOPMODEL isoladamente.

A variação entre o volume escoado observado e simulado foi inferior a 20% em todos os eventos de validação, apresentando média de 2,9%. Em 80% dos eventos os valores simulados foram subestimados. No caso da aplicação do TOPMODEL isoladamente, este fato também foi verificado.

Comparando todos os valores horários de vazão simulada dos eventos de validação com os valores horários observados, o modelo TOPMODEL apresentou tendência à subestimação destes valores. Quanto aos volumes escoados, considerando todos os eventos, a tendência do modelo também é subestimá-los.

Individualmente, o comportamento dos hidrogramas dos eventos simulados com o TOPMODEL em conjunto ao modelo de interceptação vegetal foi comparado ao apresentado quando do uso do TOPMODEL isoladamente.

- O modelo conseguiu simular o pico de vazão do evento 1 sem defasagem, o que não ocorreu quando o TOPMODEL foi aplicado isoladamente. A tendência apresentada pelo modelo foi de subestimar os valores de vazão.
- Com relação ao evento 2, nas duas situações a simulação apresentou defasagem de tempo com relação a ocorrência do segundo pico de vazão. Neste evento, o modelo também apresentou tendência à subestimação dos valores de vazão.
- Como no caso da simulação utilizando apenas o TOPMODEL, foi constatado defasagem de tempo na ocorrência do pico de vazão do evento 3. A tendência apresentada pelo modelo foi de subestimar os valores de vazão.

- Utilizando o TOPMODEL isoladamente ou acoplado, o hidrograma resultante apresentou mesmo comportamento nos dois casos para o evento 4: atraso com relação à ocorrência do primeiro pico de vazão e, adiantamento no segundo pico. A tendência apresentada pelo modelo foi de subestimar os valores de vazão em ambos os casos.
- Os hidrogramas referentes ao evento 5 foram semelhantes nos dois casos, não apresentando defasagem de tempo em relação à ocorrência da vazão de pico. Para este evento, a tendência do modelo também foi de subestimar os valores de vazão.
- Para o evento 6, os hidrogramas simulados apresentam o comportamento semelhante nas duas situações, simulando os dois picos sem defasagem de tempo. Porém, quando se considerou a precipitação interceptada, a vazão do segundo pico simulada foi 98,8L/s para 110,7L/s, sendo o valor da vazão observada igual a 98,5L/s. A tendência apresentada pelo modelo foi de superestimar os valores de vazão.
- Para o evento 7 foi constatado defasagem de tempo na ocorrência do pico de vazão. Considerando a precipitação interceptada, o a simulação apresentou valor de pico de vazão subestimado, enquanto que, utilizando o TOPMODEL isoladamente, este valor foi superestimado. Para este evento a tendência apresentada pelo modelo foi de subestimar os valores de vazão.
- Também foi observada defasagem de tempo na ocorrência do pico de vazão do evento 8 tanto para a situação de aplicação do TOPMODEL isoladamente como quando utilizado em conjunto com o modelo de interceptação vegetal. A tendência do modelo foi subestimar os valores de vazão.
- O hidrograma simulado considerando a interceptação vegetal para o evento 9 mostra que o modelo não respondeu aos valores de vazão, o que pode ser atribuído ao fato de que para este evento, a quantidade de precipitação interceptada (2,2mm) foi bastante significativa uma vez que o este evento apresenta valor de precipitação incidente muito pequeno (3,8mm). Assim, como a quantidade de água que chegou ao solo é muita pequena (1,6mm), o modelo apresentou resultados relativos ao escoamento de base.

- Para o evento 10 foi constatado defasagem de tempo na ocorrência do pico de vazão. Considerando a precipitação interceptada, a simulação apresentou valor de pico de vazão superestimado, enquanto que, utilizando o TOPMODEL isoladamente, este valor foi subestimado. Para este evento a tendência apresentada pelo modelo foi de subestimar os valores de vazão.

As defasagens observadas nas simulações de alguns eventos podem estar relacionadas à questão da escala de tempo das medidas de chuva do posto em relação à precipitação realmente ocorrida na bacia.

#### **6.1.2.2.1.3.5.2. Resultados considerando a hipótese H2 de distribuição da precipitação interceptada**

Os valores simulados de vazão máxima variaram de 48,3L/s (evento 10) a 308,6L/s (evento 1); o volume escoado simulado variou de  $2,99 \times 10^6$ L (evento 10) a  $6,92 \times 10^6$ L (evento 4); o coeficiente de escoamento simulado variou de 3,1% a (evento 1) a 75,6,% (evento 9), apresentando valor médio de 14,8% assim como observado nos resultados referentes à hipótese H1.

A variação entre os valores de vazão máxima observada e simulada foi inferior a 25% em todos os eventos, apresentando valor médio de -4,25% ou, em módulo, 5,7%. Para a maioria dos eventos (60%), a vazão máxima foi superestimada. Este fato também foi notado quando se aplicou o TOPMODEL isoladamente.

A variação entre o volume escoado observado e simulado foi inferior a 15% em todos os eventos de validação, apresentando média de 2,3%. Em 80% dos eventos os valores simulados foram superestimados. No caso da aplicação do TOPMODEL isoladamente, este fato também foi verificado.

Comparando todos os valores horários de vazão simulada dos eventos de validação com os valores horários observados, o modelo TOPMODEL apresentou tendência à subestimação destes valores. Quanto aos volumes escoados, considerando todos os eventos, a tendência do modelo também é subestimá-los.

As observações realizadas para cada evento de simulação, constantes para a hipótese H1 são todas válidas para a hipótese H2.

## 7. CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos neste trabalho concluiu-se que:

- Foi possível determinar e validar um conjunto de parâmetros do modelo TOPMODEL válido para as simulações dos eventos de chuva e vazão analisados. Os valores destes parâmetros encontram-se dentro da faixa de variação da literatura. Com utilização dos parâmetros determinados, as vazões de pico simuladas nos eventos de calibração variaram em média, 3,1%, com relação aos valores observados. Nos eventos de validação, a média foi de -0,6%.
- A partir de um modelo para estimativa da lâmina de água que atinge o solo, desenvolvido para a cultura de cana-de-açúcar, e considerando o escoamento pelo colmo das plantas, desenvolveu-se um modelo mais adequado para a determinação da quantidade de água que efetivamente chega ao solo. Utilizando esse modelo, os valores de precipitação foram reduzidos, em média, 23,7%, o que demonstra a importância de se considerar o processo de interceptação de chuva pela cobertura vegetal.
- Foi possível determinar e validar um conjunto de parâmetros do modelo TOPMODEL válido para as simulações dos eventos de chuva e vazão, considerando a interceptação de chuva distribuída, de acordo com as duas hipóteses assumidas. Os valores encontrados para estes parâmetros também se encontram dentro da faixa da literatura. Com utilização dos parâmetros assim determinados, as vazões de pico simuladas nos eventos de calibração, considerando a hipótese H1, variaram em média, -1,2%, com relação aos valores observados. Nos eventos de validação, a média foi de -3,1%. Considerando a hipótese H2, esses valores foram 2,6% e -4,2%, respectivamente.
- A hipótese H2 de distribuição da precipitação interceptada apresentou resultados de simulação superiores aos observados quando do uso da hipótese H1. A hipótese H2 representa o processo de interceptação da chuva pela cobertura vegetal de forma mais próxima das condições reais.

- O tempo de concentração da bacia é menor que o intervalo de tempo das simulações, fazendo com que não ocorressem grandes problemas de defasagem da vazão de pico.
- Os valores de coeficiente de escoamento foram superiores, quando se considerou as hipóteses H1 e H2, devido à diminuição da quantidade de água que chega ao solo.
- Considerando todos os eventos analisados (calibração e validação), a aplicação do modelo TOPMODEL, isoladamente, apresentou os seguintes valores médios de variação entre valores observados e simulados: 0,6% para vazão máxima; 0,9% para o volume escoado. A eficiência média do modelo foi de 50,8%. Para simulações com o TOPMODEL considerando a hipótese H1 de precipitação interceptada pela cobertura vegetal, os valores médios foram: -2,5% para vazão máxima; 2,0% para o volume escoado. A eficiência média do modelo nesta situação foi de 41,3%. Considerando a hipótese H2, os valores médios foram: -2,0% para vazão máxima; 1,7% para o volume escoado, e a eficiência média do modelo foi de 48,6%.
- A comparação entre os resultados da utilização do modelo TOPMODEL em conjunto ao modelo de interceptação vegetal e os obtidos considerando o TOPMODEL em suas condições originais apresentaram-se muito próximos aos obtidos e comprovaram a hipótese assumida na tese.

## 8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMBROISE, B., BEVEN, K., FREER, J. Toward a generalization of the TOPMODEL concepts: Topographic indices of hydrological similarity. **Water Resources Research**, v. 32 (7): 2135 – 2145, 1996.

BERGSTRÖM, S. Principles and confidence in hydrological modelling. **Nordic Hydrology**, v. 22: 123 - 136, 1991.

BEVEN, K. TOPMODEL: Changing ideas in hydrology – The case of physically-based models. **Hydrological Processes**, v. 105: 157 - 172, 1989.

BEVEN, K. TOPMODEL: A critique. **Hydrological Processes**, v. 11: 1069 - 1085, 1997.

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

BEVEN, K., KIRKBY, M. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. **Hydrological Sciences – Bulletin des Sciences Hydrologiques**, v. 24: 43 - 69, 1979.

BLAZKOVA, S., BEVEN, K. Flood frequency prediction for data limited catchments in the Czech Republic using a stochastic rainfall model and TOPMODEL. **Journal of Hydrology**, v. 195: 256 – 278, 1997.

BONN F., ROCHON G. **Precis de teledetection - principes et methodes**. Press de l'Universite du Quebec, v.1, 1485 p., 1992.

BOYER, E. W., HORNBERGER, G. M., BENCALA, K. E., McKNIGHT, D. Overview of a simple model describing variation of dissolved organic carbon in an upland catchment. **Ecological Modelling**, v. 86: 183 - 188, 1996.

BRANDÃO, D., TEIXEIRA FILHO, J., ROCHA, J. V. Avaliação de áreas degradadas em bacias hidrográficas a partir da erodibilidade dos terrenos. In: IV CONGRESSO INTERNACIONAL DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 2001, Chillán, Chile. **Anais...** Chillán, Chile, 2001, v.1: 349 – 352.

BRASINGTON, J., RICHARDS, K. Interactions between model predictions, parameters and dtm scales for TOPMODEL. **Computers & Geosciences**, v. 24 (4): 299 - 314, 1998.

BUTLER, D. R., HUBAND, N. D. S. Throughfall e stemflow in wheat. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 35: 329 – 338, 1985.

BUTLER, D. R., KING, S.C. An inexpensive balance for measuring throughfall in cereals. **Agricultural Meteorology**, v. 27: 233 – 240, 1982.

BUYTAERT, W., CÉLLERI, R., DE BIÉVRE, B., DECKERS, J., WYSEURE, G. **Modelando el comportamiento hidrológico de microcuencas de páramo em el Sur del Ecuador com TOPMODEL**. <[www.congresocuencas.org.pe](http://www.congresocuencas.org.pe)>, 07/07/2004.

CALDER, I. R. A model of transpiration and interception loss from a spruce forest in Plynlimon, central Wales. **Journal of Hydrology**, v. 33: 247 - 265, 1977.

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

CASTILHO, C. P. G. **Interceptação de chuvas na cultura de cana-de-açúcar (*Saccharum Officinarum* ssp.)**. Campinas, 2000. 256p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Agrícola, UNICAMP, 2000.



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

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de sistemas ambientais**. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, 1999.

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**. Campinas, 2003. 191p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Civil, UNICAMP, 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**. John & Sons, Chichester – UK. p. 289 – 314. 1997.

DE BRIEVE, B. TIMBE, L. **Requerimentos de modelos hidrológicos distribuídos**. <<http://www.condesan.org/paramos2/Jun16comentarioBDB.htm>> 17/05/2002.

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

FERREIRA, L. **Simulação hidrológica utilizando o modelo TOPMODEL em bacias rurais: Estudo de caso na bacia do Ribeirão Marins, seção Monjolinho - SP**. Campinas, 2004. 205p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Agrícola, UNICAMP, 2004.

FLEMING, G. **Computer Techniques in Hydrology**. New York: Environmental Sciences Series Elsevier, 1977. 33p., p. 70 – 71.

FRANCHINI, M., WENDLING, J., OBLED, C., TODINI, E. Physical interpretation and sensitivity analysis of the TOPMODEL. **Journal of Hydrology**, v. 175: 293 – 338, 1996.

FREITAS, M. A. V. (Org.). **O estado das águas no Brasil – Perspectivas de gestão e informação de recursos hídricos**. Brasília, DF: ANEEL, SIH, MMA, SRH, MME, 1999. 334 p.

HEIN, M. **Espacialização de duas microbacias hidrográficas do Rio Piracicaba para modelagem hidrológica**. Campinas, 2000. 291p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Agrícola, UNICAMP, 2000.

HEIN, M., TEIXEIRA FILHO, J. Estudo de esquemas de espacialização em micro bacias hidrográficas. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 2000, México. **Anais...**México, 2000.

HELVEY, J.D., PATRIC, J. H. Desing criteria for interception studies. **International Association Science Hydrology**. Extract., v. 67: 131 – 137, 1965.

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

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

IORGULESCO, I., JORDAN, J. P. Validation of TOPMODEL on a small Swiss catchment. **Journal of Hydrology**, v. 159 (1 – 4): 255 - 273, 1994.

KALMA, J.D., BATES, B.C., WOODS, R.A. Predicting catchment-scale soil moisture status with limited field measurements. **Hydrological Processes**, v. 9: 445 - 468, 1995.

KIRKBY, M. J. Hydrograph modeling strategies, in PEEL, R., CHISHOLM, M., HAGGET, P. (Eds), **Process in Physical and Human Geography**, Heinemann, London, 1975. p. 69 -90.

LARSON, C. L., ONSTAD, C. A., RICHARDSON, H. H., DALE, G., BROOKS, K. N. some particular watersheds models. In: HAAN, C. T. ed., JOHNSON, H. P. ed., BRAKENSIEK, D. L. ed. **Hydrologic Modeling of Small Watersheds. Michigan: American Society of Agricultural Engineers**, 1982. 553p. p. 409 – 434.

LAURINI R., MILLERET-RAFFORT F. Les bases de données en géomatique. **Traité de nouvelles technologies - séries géomatiques**. Hermes, Paris, 340 p., 1993.

LEUNING, R., CONDON, A. G., DUNIN, F. X. *et al.* Rainfall interception and evaporation from soil below a wheat canopy. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 67: 221 – 238, 1994.

LUCHIARI, D. J. F. **Estudo da repartição das chuvas em culturas de citros**. Limeira, 1989. 121p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia de Limeira, UNICAMP, 1989.

LULU, J., TEIXEIRA FILHO, J. **Desenvolvimento do Índice de Área Foliar para a cultura de cana-de-açúcar**. Campinas, 1999. 100p. Relatório de Iniciação Científica – Faculdade de Engenharia Agrícola, UNICAMP, 1999.

MARTINS, M. E. **Produção de sedimentos em bacias hidrográficas cultivadas com cana-de-açúcar (*Saccharum, ssp*) e citros (*Citrus, ssp*)**. Campinas, 2001. 327p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia Civil, UNICAMP, 2001.

MINE, M. R. M. A., CLARKE, R. T. O uso do TOPMODEL em condições brasileiras: resultados preliminares. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 1 (2: jul/dez): 89 – 105, 1996.

MIRANDA, R. A. C., BUTLER, D. R. Interception of rainfall in a hedgerow apple orchard. **Journal of Hydrology**, v. 87: 245 - 253, 1986.

MIRANDA, R. A. C. Partitioning of rainfall in a cocoa (*Theobroma cacao* Lour.) plantation. **Hydrological Processes**, v. 8: 351 - 358, 1994.

MONTESINOS-BARRIOS, P., BEVEN, K. **Evaluation of TOPMODEL**. <[www3.bae.ncsu.edu/s273/ModelProj/topmodel.pdf](http://www3.bae.ncsu.edu/s273/ModelProj/topmodel.pdf)> 07/07/2004.

MOORE, I. D., GRAYSON, R. B. Terrain-Based catchment partitioning and runoff prediction using elevation data. **Water Resources Research**, v. 27 (6): 1177 - 1191, 1991.

MOTA, J. L. O. Modelos matematicos y s aplicacion al manejo de cuencas hidrograficas. In: IX CONGRESSO NACIONAL DE IRRIGACIÓN, 1999, Culiacán, Sinaloa, México. **Anais...** Culiacán, Sinaloa, México, 1999.

**NET LIMEIRA**. <<http://www.limeira.com.br>> 04/06/2001.

PEREIRA, N. M., PEREIRA, S. Y., CAVALCANTI, R. N., GENOVEZ, A. M., PAULA, G. Disponibilidade hídrica da bacia do rio Piracicaba, estado de São Paulo, Brasil. **Holos Environment**, v. 4 (2): 97 - 113, 2004.

PETERS, N. E., FREER, J., BEVEN, K. J. Modeling hydrologic responses in a small forested watershed by a new dynamic TOPMODEL (Panola Mountain, Georgia, USA). In: S. UHLENBROOK, C. LEIBUNDGUT and J. J. Mc DONNELL (eds), Runoff Generation and Implications for River Basin Modeling. **Freiburg Schriften zur Hydrologic**, v. 13: 318 - 325, 2001.

POELS, R. L. H. Hydrology of a tropical rain forest in Suriname. **Netherlands Journal of Agricultural Science**, v. 37: 379 - 382, 1989.

**PREFEITURA MUNICIPAL DE LIMEIRA.** < www. limeira.sp.gov.br> 04/06/2001.

QUINN, P., BEVEN, K., CHEVALLIER, P., PLANCHON, O. The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models. **Hydrological Processes**, v. 5: 59 - 79, 1991.

QUINN, P. F., BEVEN, K. J., LAMB, R. The  $\ln(\alpha/\tan\beta)$  index: how to calculate it and how to use it within the TOPMODEL framework. **Hydrological Processes**, v. 9: 161 - 182, 1995.

RAO, S. A. Interception losses of rainfall from cashew trees. **Journal of Hydrology**, v. 90: 293 - 301, 1987.

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.** São Carlos, 2002. 116p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 2002.

RENNÓ, C. D. , SOARES, J. V. Uso do índice topográfico como estimador da profundidade do lençol freático. In: XI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 2003, Belo Horizonte. **Anais...** Belo Horizonte: INPE, 2003. p. 2579 – 2588.

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

ROBSON, A. J., WHITTEHEAD, P. G., JOHNSON, R. C. An application of a physically based semi-distributed model to the Balquhider catchments. **Journal of hydrology**, v. 145: 357 - 370, 1993.

ROUET P. **Les données dans les systèmes d'information géographiques.** Traité de nouvelles technologies - séries géographie assistée par ordinateur, 278 p., 1991.

SABESP (COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO). **Processo de gestão operacional para redução de perdas no sistema de abastecimento de água na região metropolitana de São Paulo.** 2002. <[www.aspef.org.br/arquivos/seminario2/pdf](http://www.aspef.org.br/arquivos/seminario2/pdf)> 20/04/2005.

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

SAULNIER, G. M., BEVEN, K., OBLED, C. Digital elevation analysis for distributed modelling: reducing scale dependence in effective hydraulic. **Water Resources Research**, v. 33 (9): 2097 - 2101, 1997a.

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

SCANLON, T. M., RAFFENSPERGER, J. P., HORNBERGER, G. M., CLAPP, R. B. Shallow subsurface storm flow in a forested headwater catchment: Observations and modelling using a modified TOPMODEL. **Water Resources Research**, v. 36 (9): 2575 – 2586, 2000.

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

SCHULER, A. E., MORAES, J. M., MILDE, L. C., *et al.* Análise da representatividade física dos parâmetros do TOPMODEL em uma bacia de mesoescala localizada nas cabeceiras do rio Corumbataí. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 5, (2: abr/jun): 5 – 25, 2000.

SILVA, C. L. A., RAMOS, M. M., FERREIRA, P. A., et al. Modelagem da precipitação efetiva na cultura de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 29 (6): 929 - 937, jun.1994.

SINGH, V. P. Hydrologic systems. **Water modeling**, v. 1. Prentice Hall, 320 p., 1989.

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

STEWART, J. B. Evaporation from the wet canopy of a pine forest. **Water Resources Research**, v. 13 (6): 951 – 921, 1977.

TUCCI, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. Porto alegre: editora Universidade/ UFRS/ Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1998.

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: 569 – 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 (4: out/dez): 121 – 139, 2000.

VIEIRA, D. B. **Avaliação da interceptação hidrológica e o efeito da vinhaça em cana-de-açúcar**. Limeira, 1982. 124p. Tese (Livre Docência) - Faculdade de Engenharia de Limeira, UNICAMP, 1982.

VILLENEUVE, J-P., HOULE, S., ISABEL, D. A distributed hydrological model adapted to the automatic calibration of parameters. **Journal of Hydrology**, v. 87: 1 - 8, 1986.

WIGMOSTA, M. S., LANCE W. V., LETTENMAIER J. A distributed hydrology-vegetation model for complex terrain. **Water Resources Reserch**, v. 30 (6): 1665 - 1679, 1994.

WOLOCK, D. M. Effects of subbasin size on topographic characteristics and simulated flow paths in Sleepers River watershed, Vemont. **Water Resources Reserch**, v. 31 (8): 1989 - 1997, 1995.

WOOD, E. F., SIVAPALAN, M., BEVEN, K., BAND, L. Effects of spatial variability and scale with implications to hydrologic modeling. **Journal of Hydrology**, v. 102: 29 - 47, 1988.

WOOD, E. F., LETTENMAIER, D. P., ZARTARIAN, V. G. A land-surface hydrology parameterization with subgrid variability for general circulation models. **Journal Geophys. Res.**, v. 97: 2717 - 2728, 1992.

XAVIER, L. N. R., ROTUNNO FILHO, O C., ARAÚJO, A. A., DI BELLO, R. C. Análise da incerteza causada pela representação da precipitação no modelo TOPMODEL. In: XV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 2003, Curitiba, Brasil. **Anais...** Curitiba, Brasil, 2003.

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.** São Carlos, 1998. 99p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 1998.

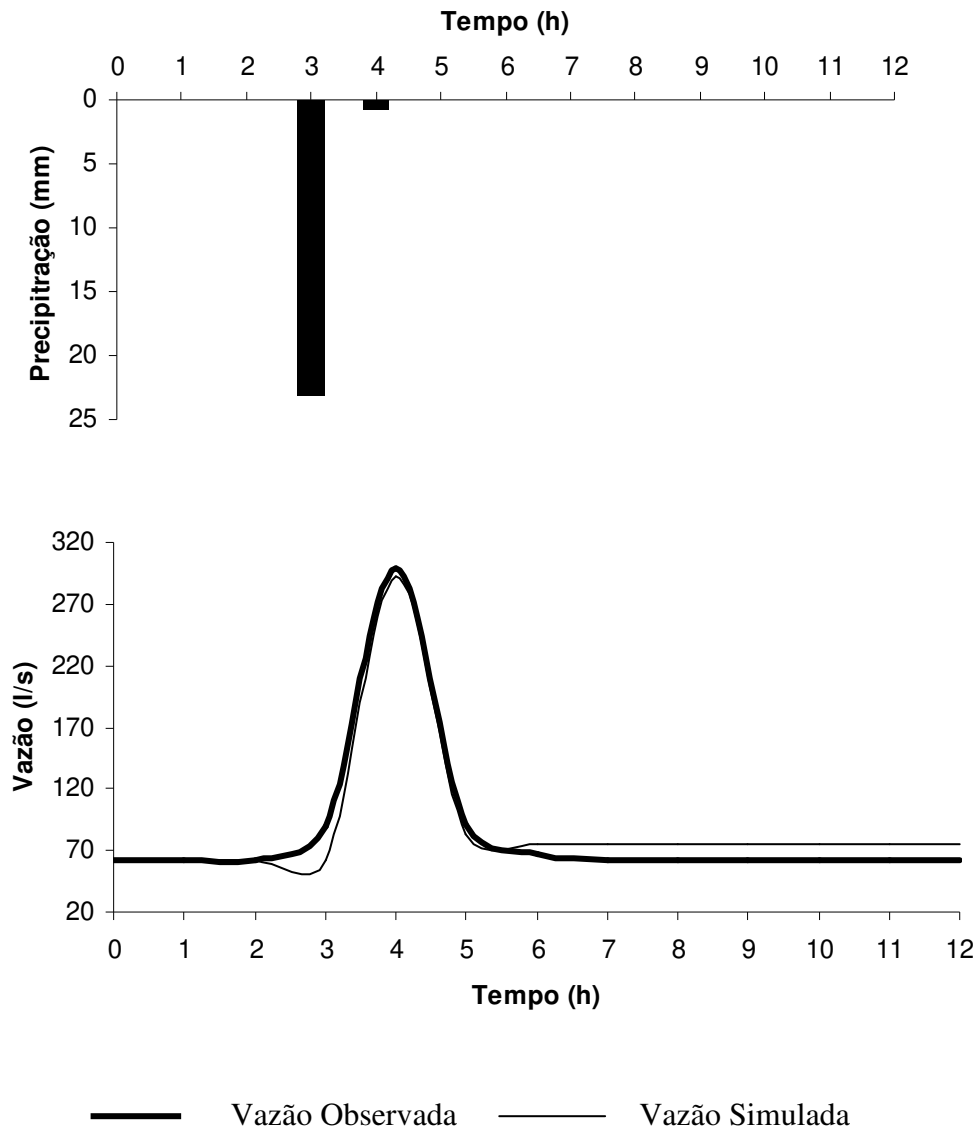
ZHANG, W, MONTGOMERY, D. R.. Digital elevation model grid size, landscape representation, and hydrologic simulations. **Water Resources Reserch**, v. 30 (4): 1019 - 1028, 1994.



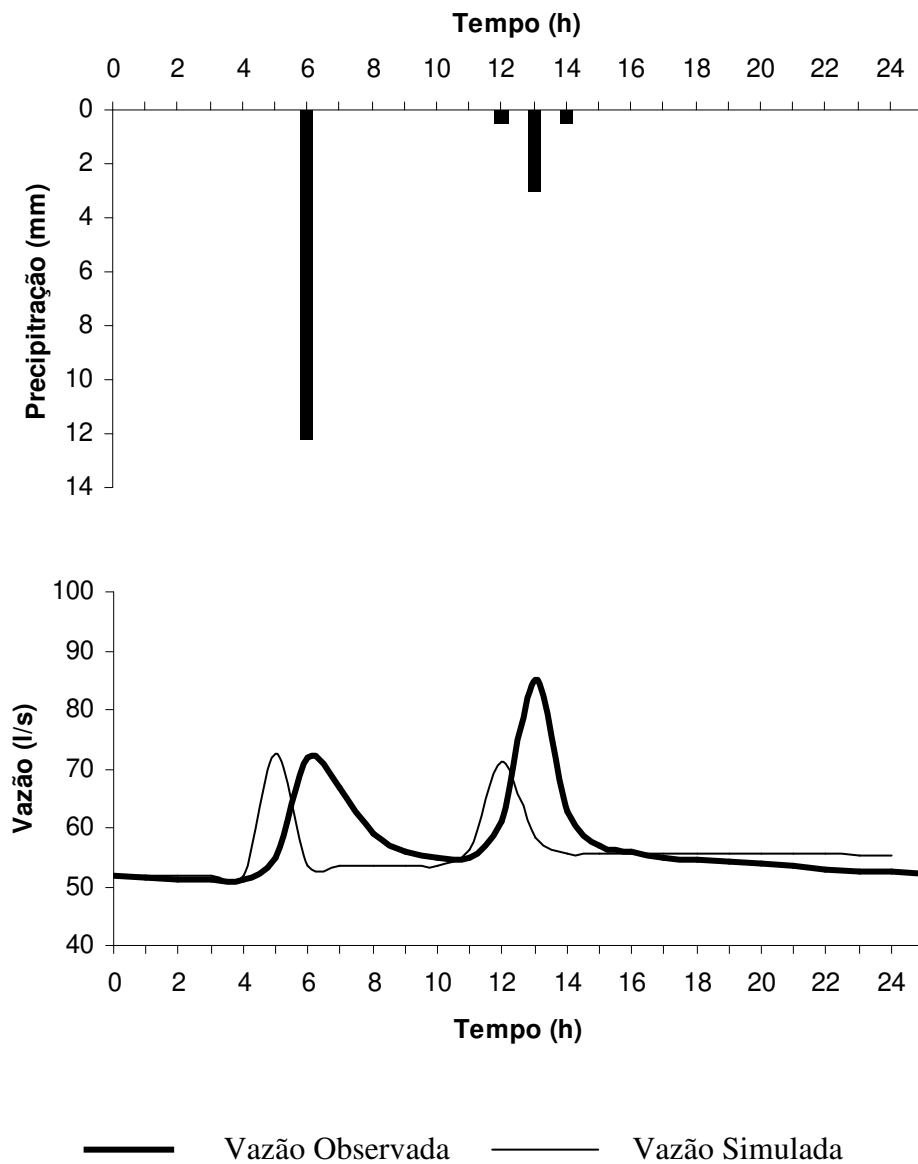
## 9. APÊNDICES

## **APÊNDICE A – Aplicação do modelo TOPMODEL**

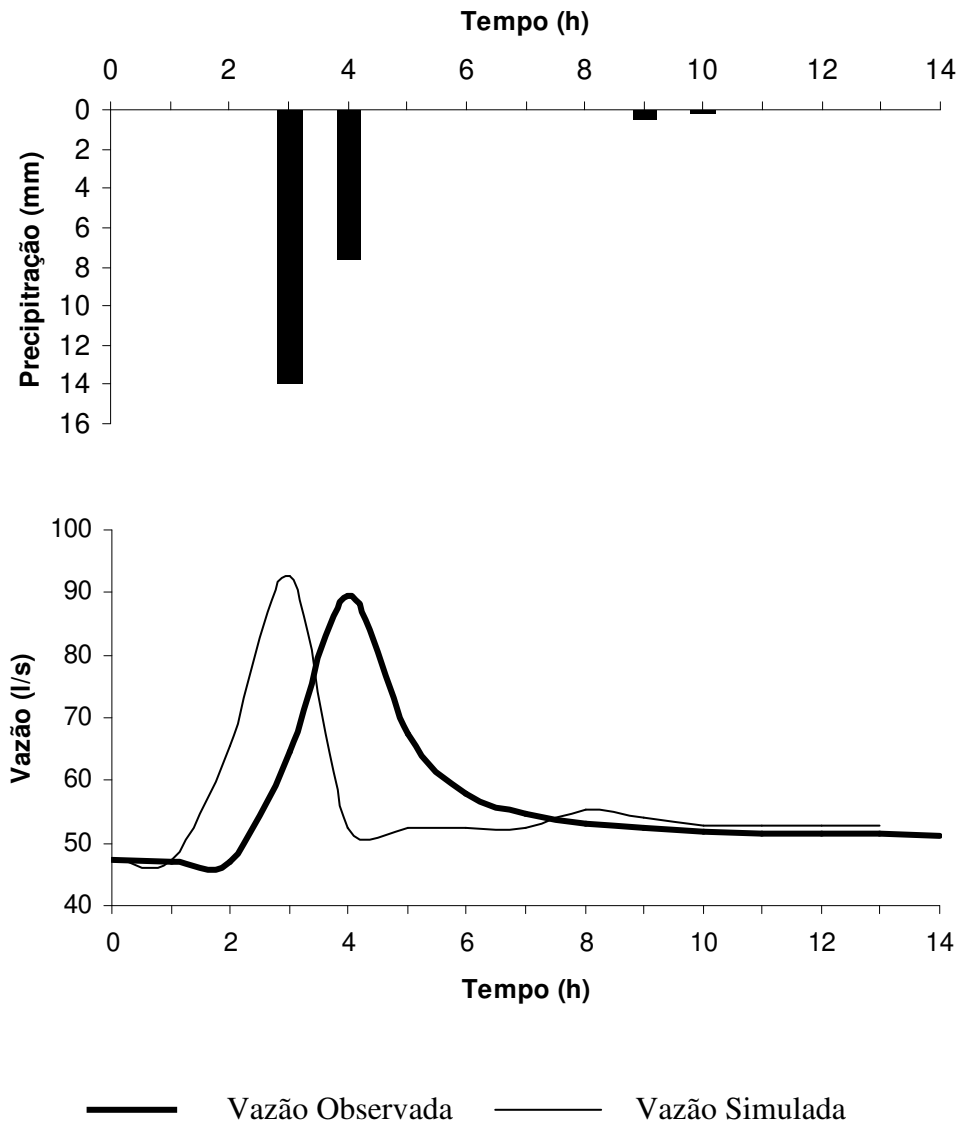
**APÊNDICE A.1 – Aplicação do modelo TOPMODEL –  
Eventos de Calibração**



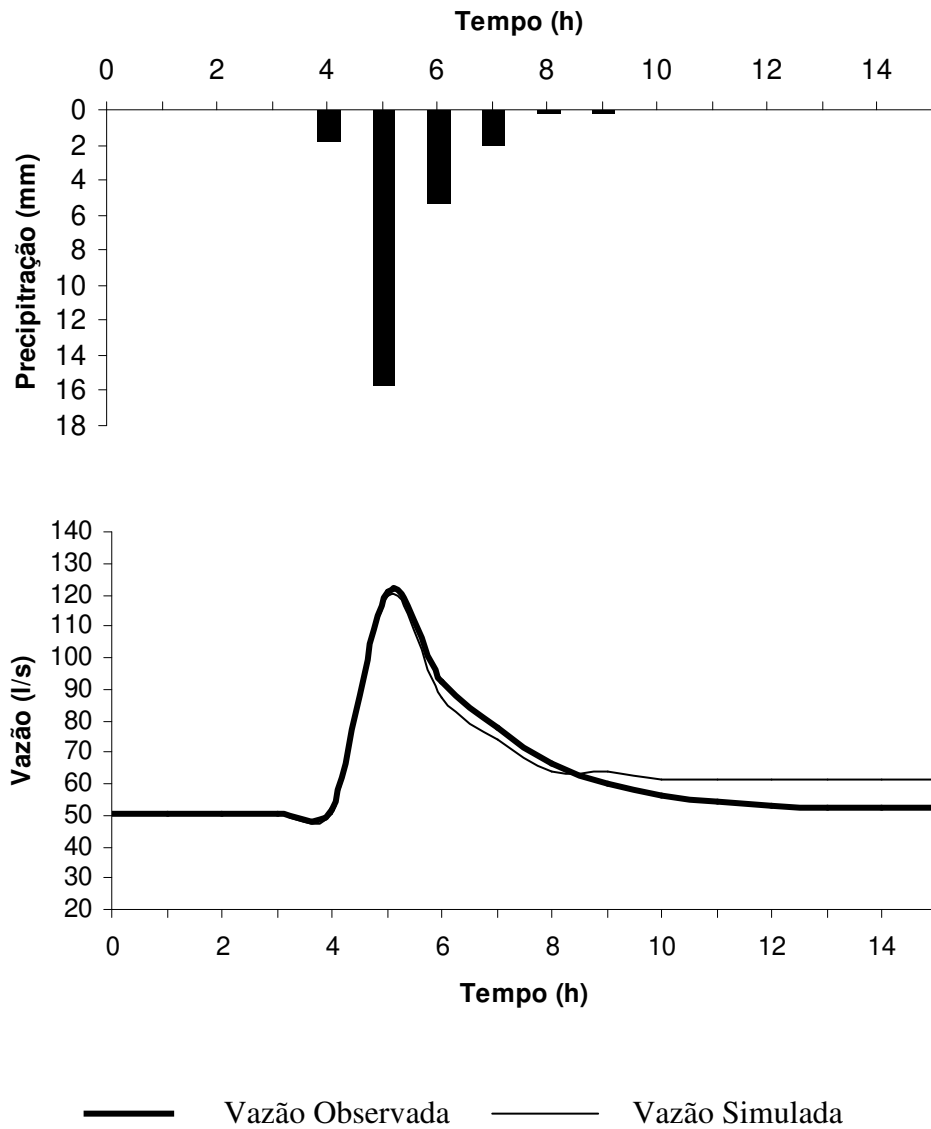
**Figura 132** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 1 (13/2/1999 a 14/2/1999) utilizado no processo de calibração na aplicação do modelo TOPMODEL.



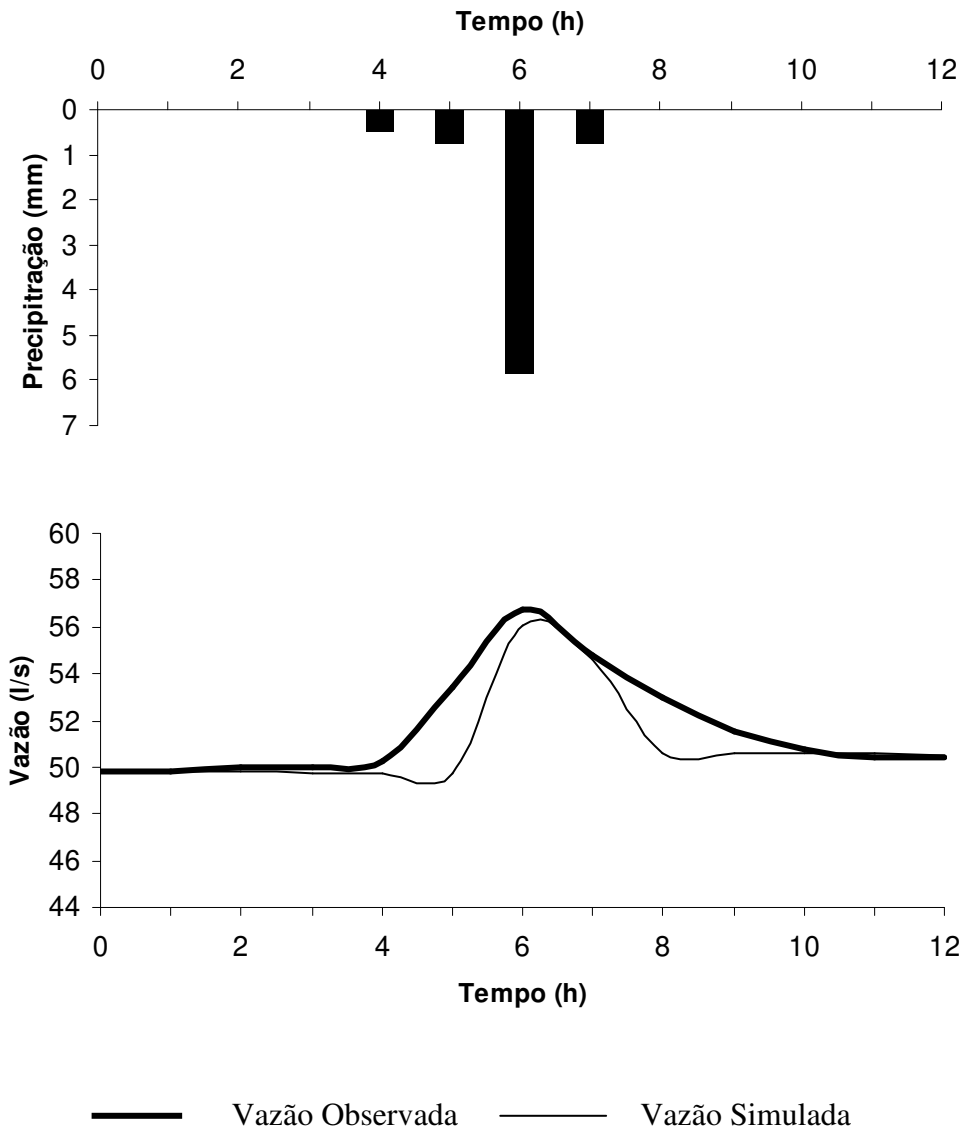
**Figura 133** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 2 (16/1/2000 a 17/1/2000) utilizado no processo de calibração na aplicação do modelo TOPMODEL.



**Figura 134** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 3 (05/3/2001 a 06/3/2001) utilizado no processo de calibração na aplicação do modelo TOPMODEL.



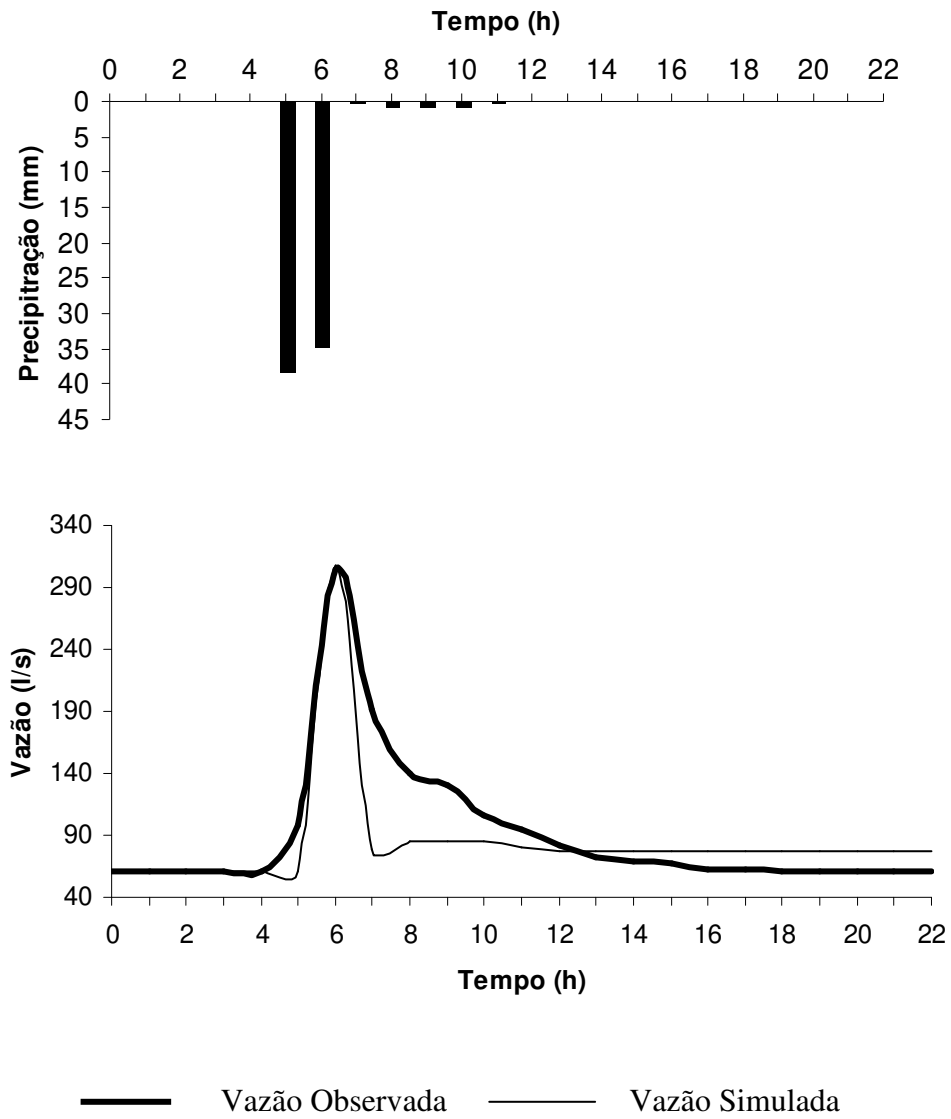
**Figura 135** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 4 (08/3/2001 a 09/3/2001) utilizado no processo de calibração na aplicação do modelo TOPMODEL.



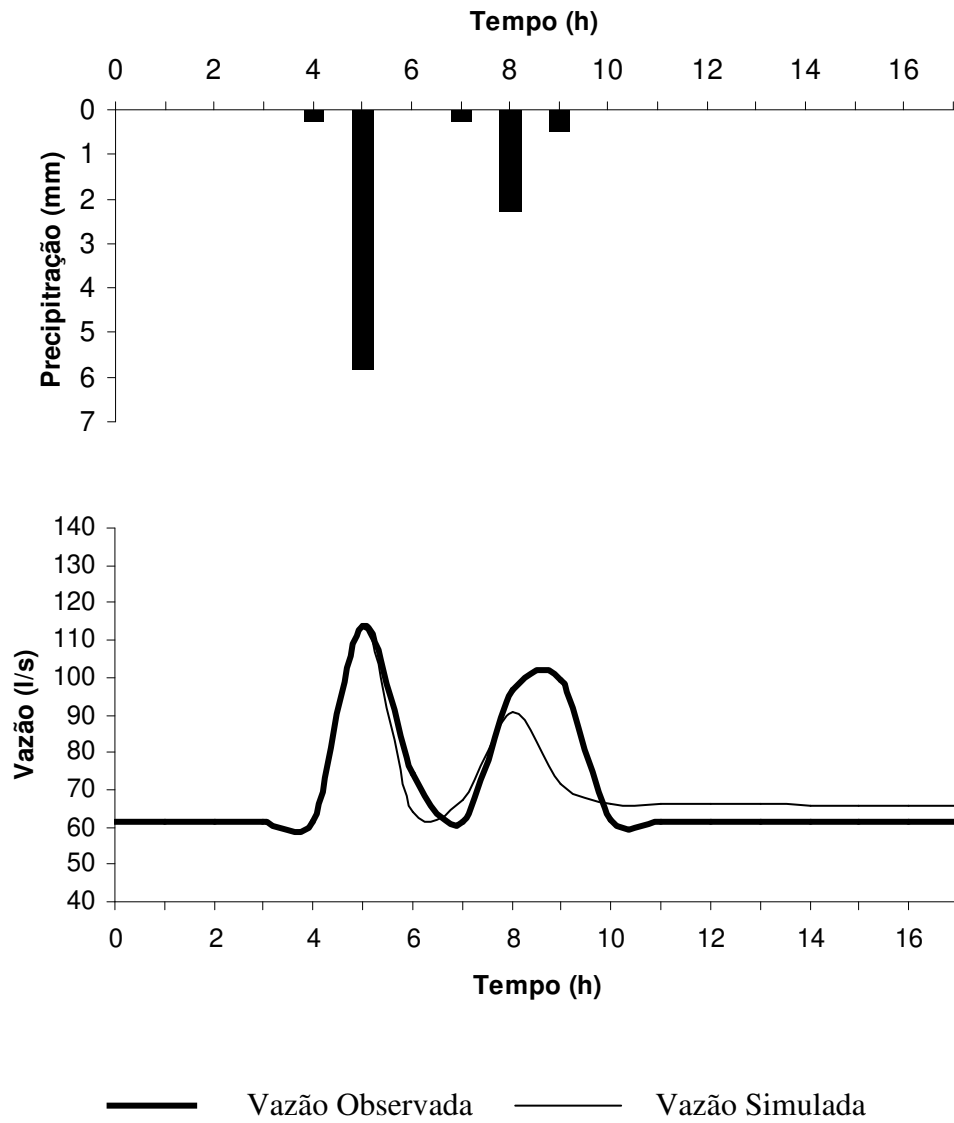
**Figura 136** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 5 (10/3/2001) utilizado no processo de calibração na aplicação do modelo TOPMODEL.



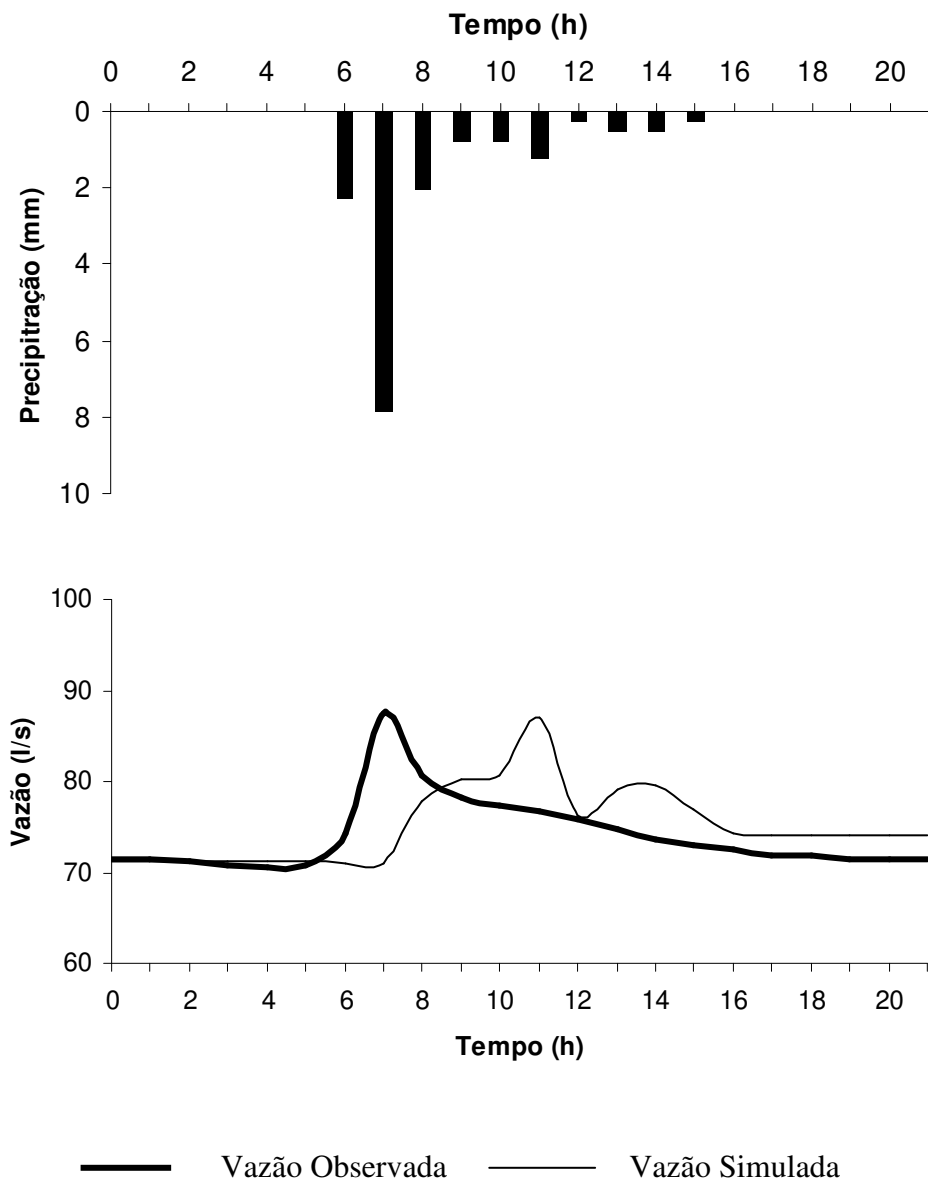
**APÊNDICE A.2 – Aplicação do modelo TOPMODEL –  
Eventos de validação**



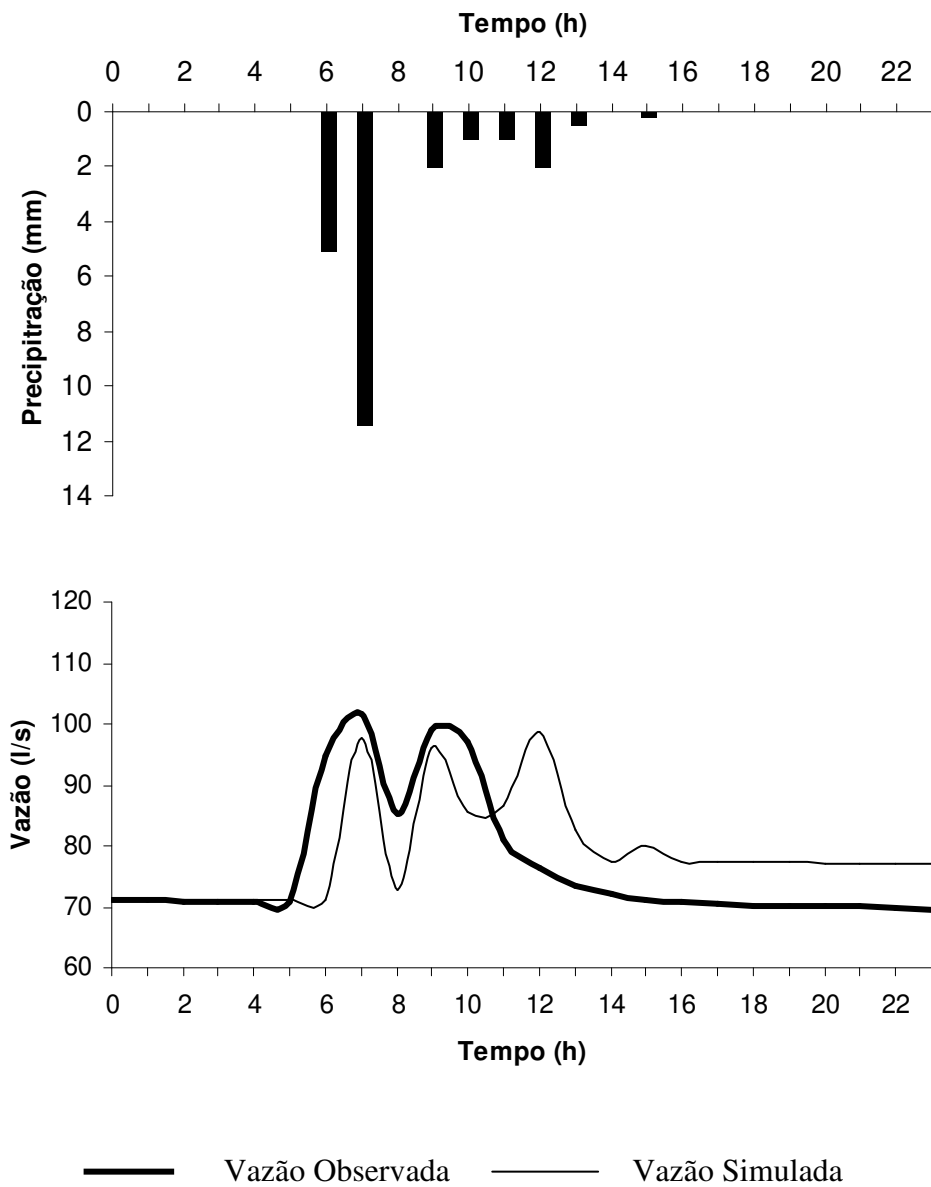
**Figura 137** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 1 (20/2/1999 a 21/2/1999) utilizado no processo de validação na aplicação do modelo TOPMODEL.



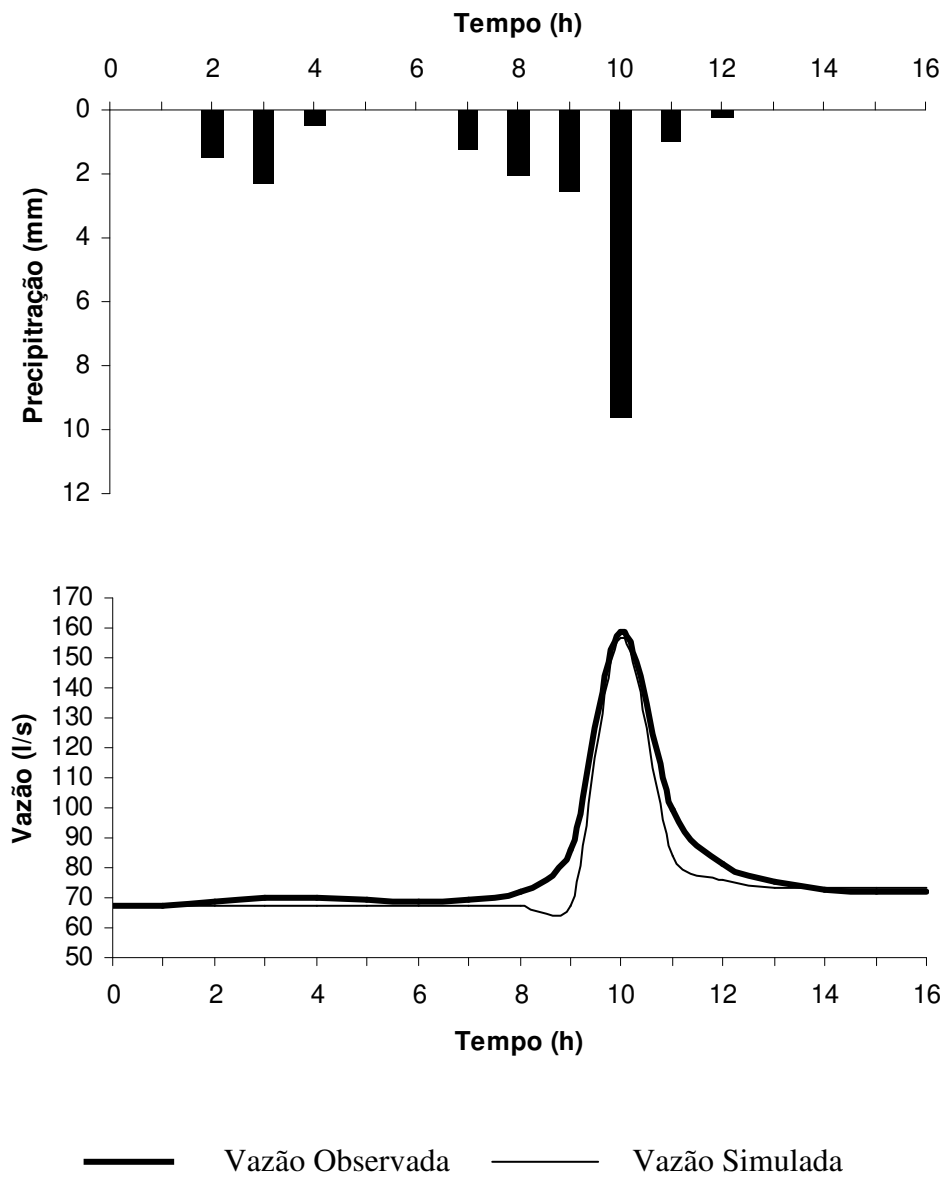
**Figura 138** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 2 (27/2/1999 a 28/2/1999) utilizado no processo de validação na aplicação do modelo TOPMODEL.



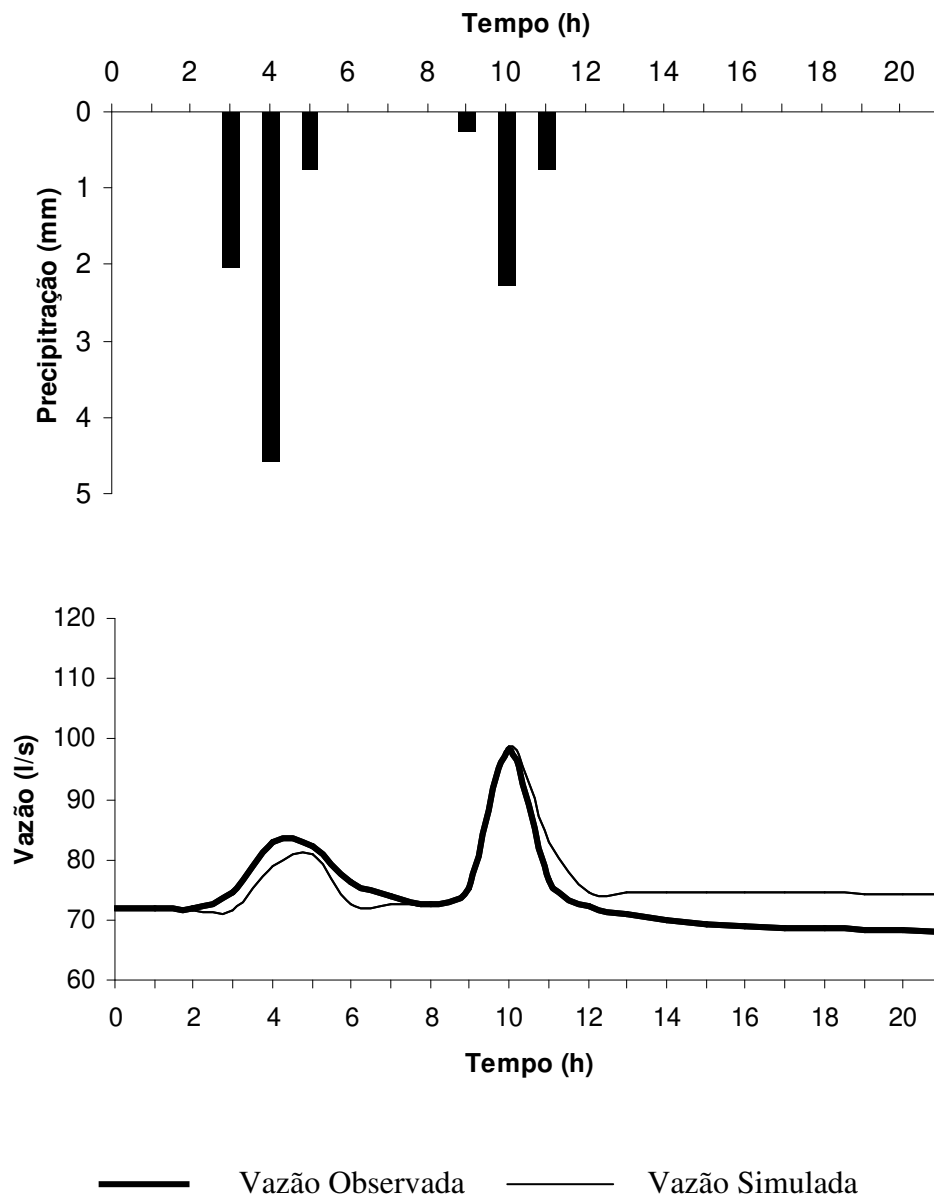
**Figura 139** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 3 (10/12/1999 a 11/12/1999) utilizado no processo de validação na aplicação do modelo TOPMODEL.



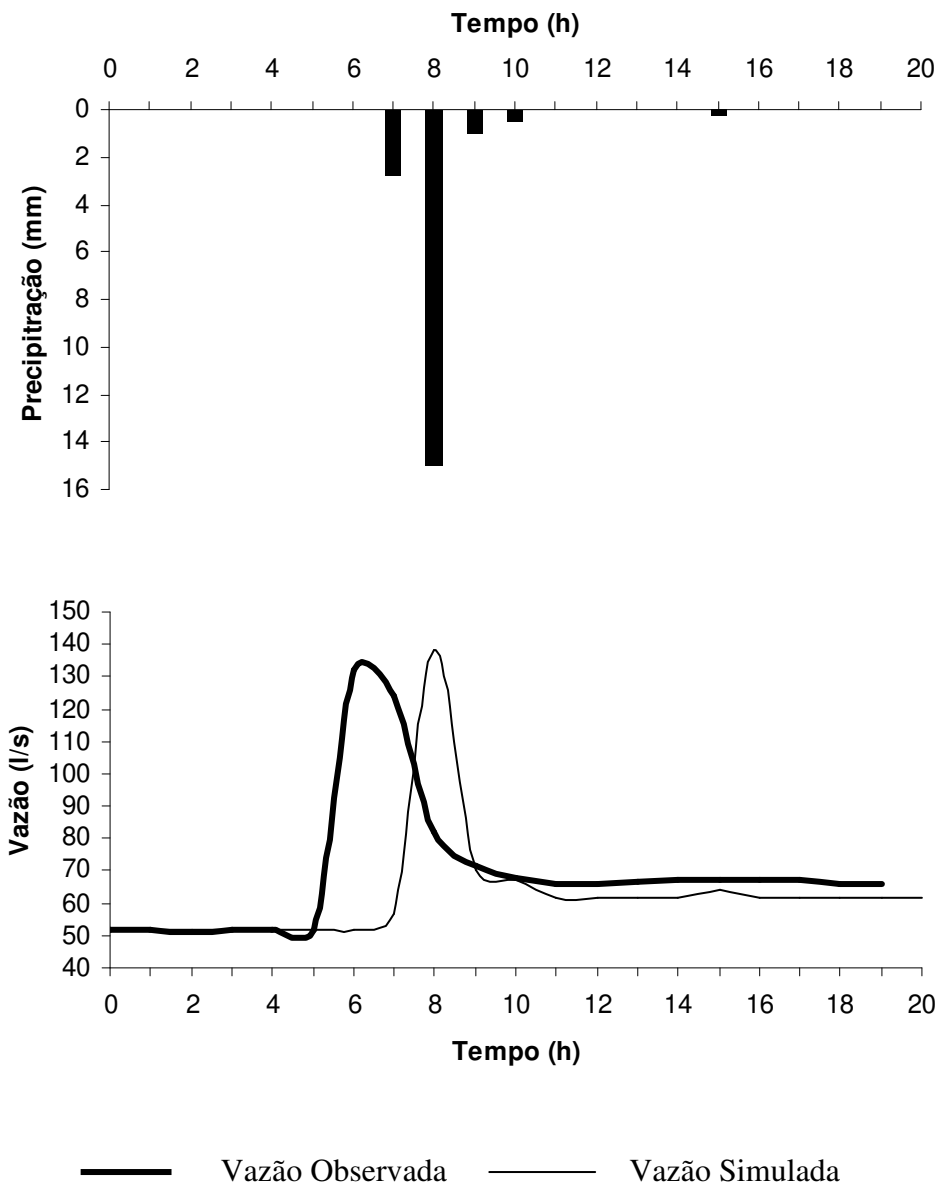
**Figura 140** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 4 (11/12/1999 a 12/12/1999) utilizado no processo de validação na aplicação do modelo TOPMODEL.



**Figura 141** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 5 (13/12/1999 a 14/12/1999) utilizado no processo de validação na aplicação do modelo TOPMODEL.

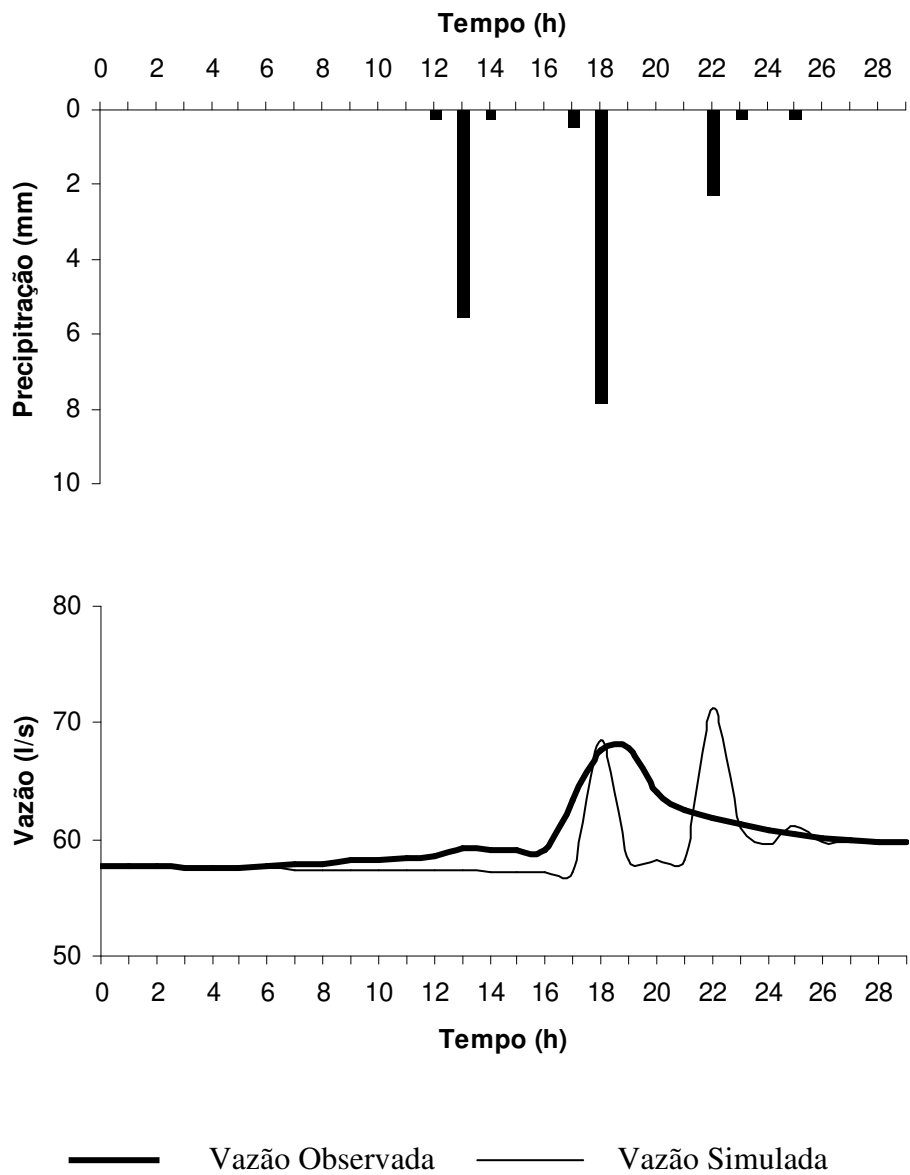


**Figura 142** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 6 (14/12/1999) utilizado no processo de validação do na aplicação modelo TOPMODEL.

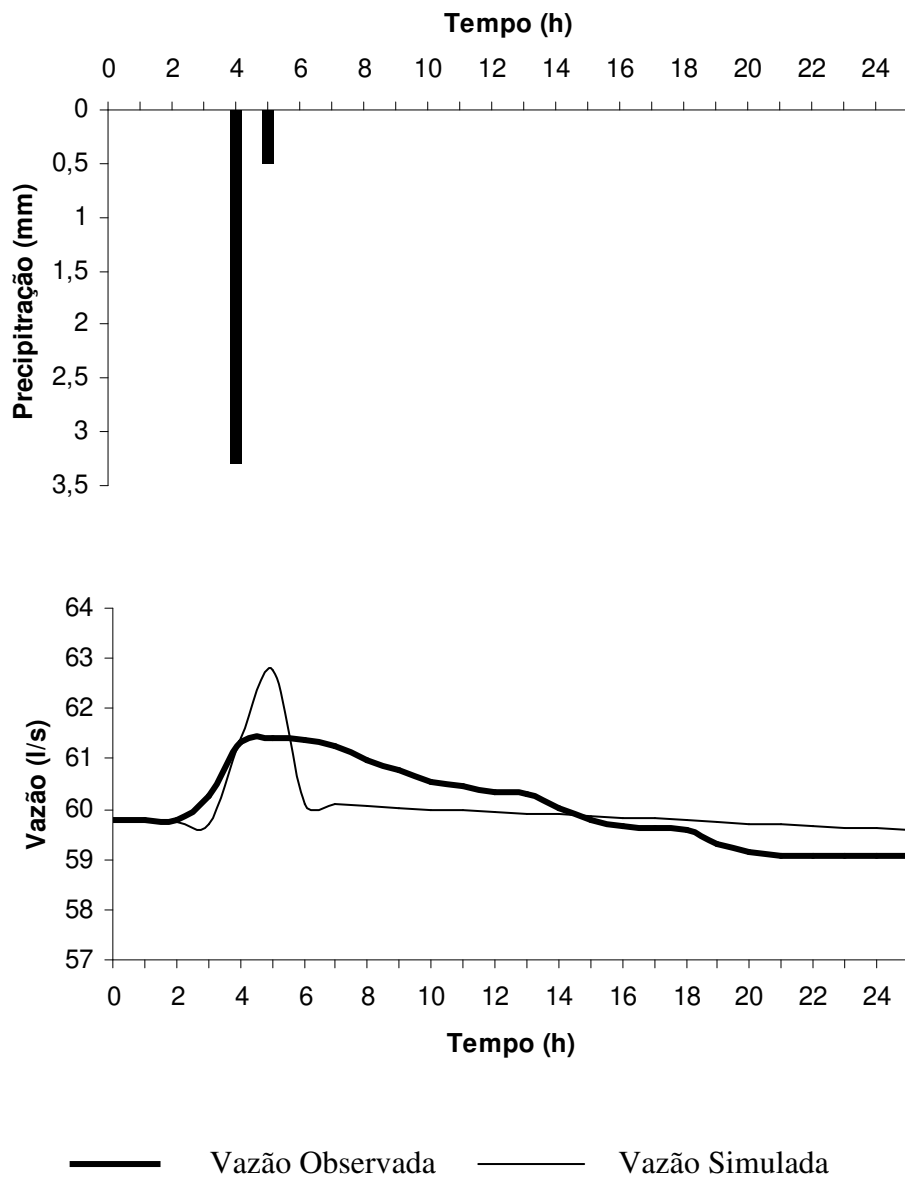


**Figura 143** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 7 (17/1/2000 a 18/1/2000) utilizado no processo de validação na aplicação do modelo TOPMODEL.

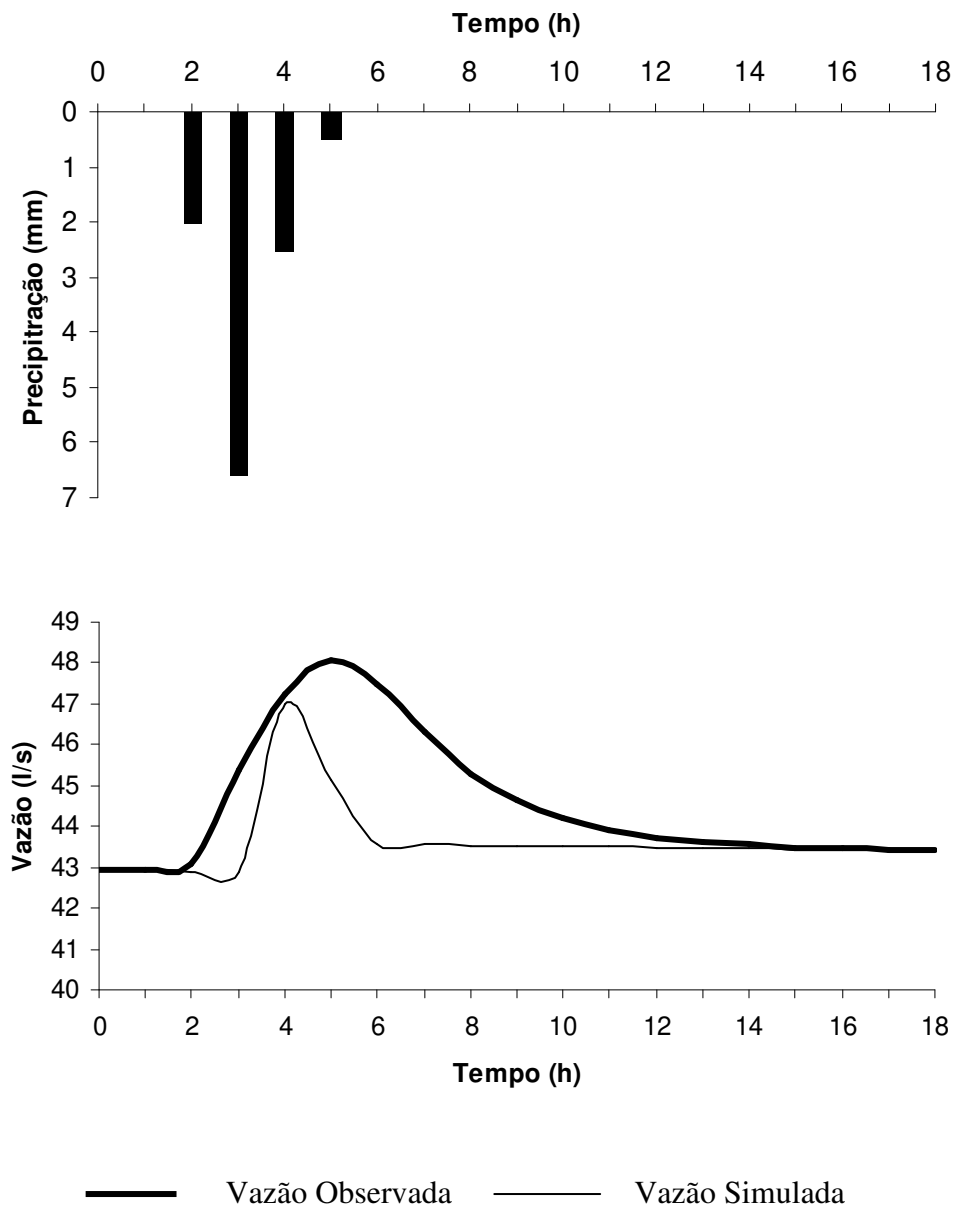




**Figura 144** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 8 (25/1/2000 a 26/1/2000) utilizado no processo de validação na aplicação do modelo TOPMODEL.



**Figura 145** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 9 (26/1/2000 a 27/1/2000) utilizado no processo de validação na aplicação do modelo TOPMODEL.

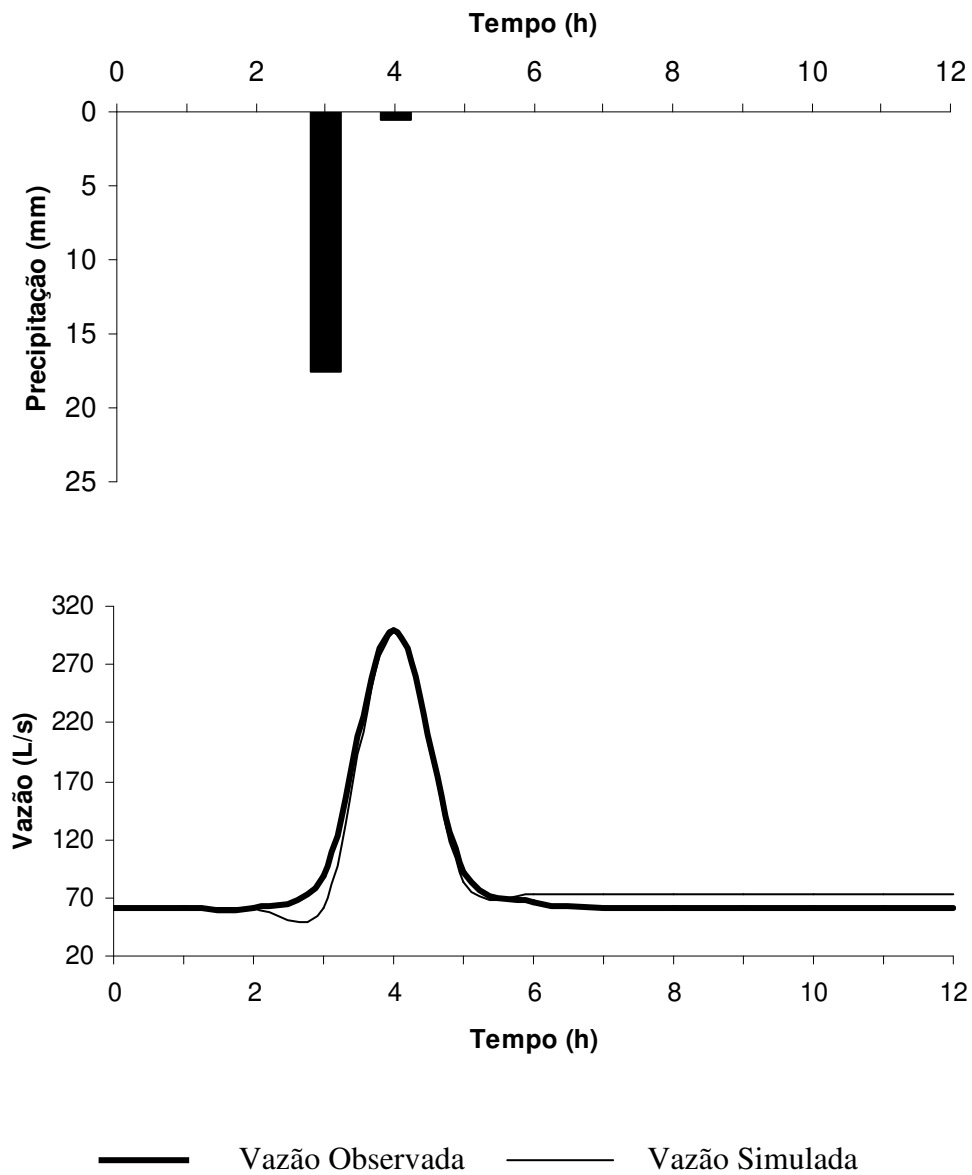


**Figura 146** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 10 (25/6/2000 a 26/6/2000) utilizado no processo de validação na aplicação do modelo TOPMODEL.

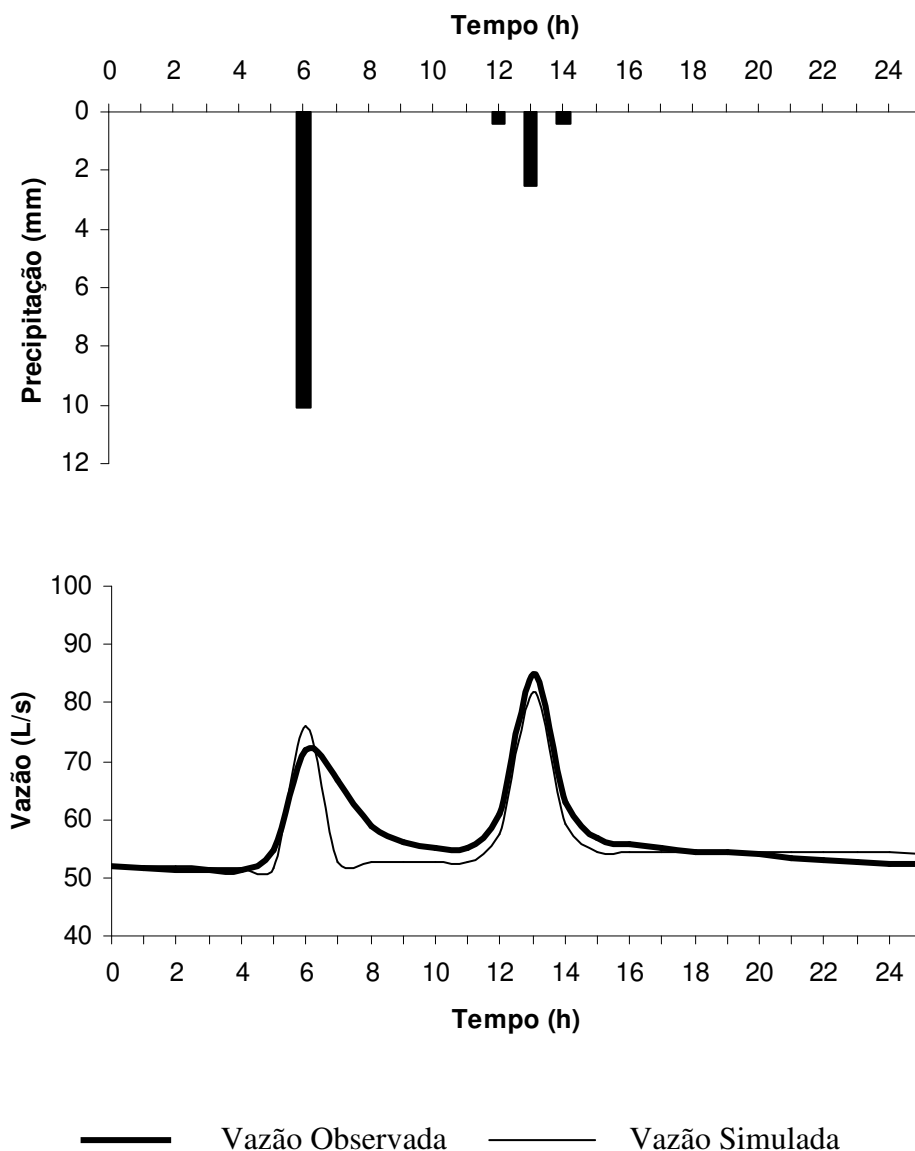
**APÊNDICE B – Aplicação do modelo TOPMODEL em conjunto a um modelo de  
interceptação vegetal**

**APÊNDICE B.1 – Aplicação do modelo TOPMODEL em conjunto a um modelo de interceptação vegetal considerando a hipótese H1 de distribuição da interceptação**

**APÊNDICE B.1.1 – Aplicação do modelo TOPMODEL em conjunto a um modelo de interceptação vegetal considerando a hipótese H1 de distribuição da interceptação –  
Eventos de calibração**

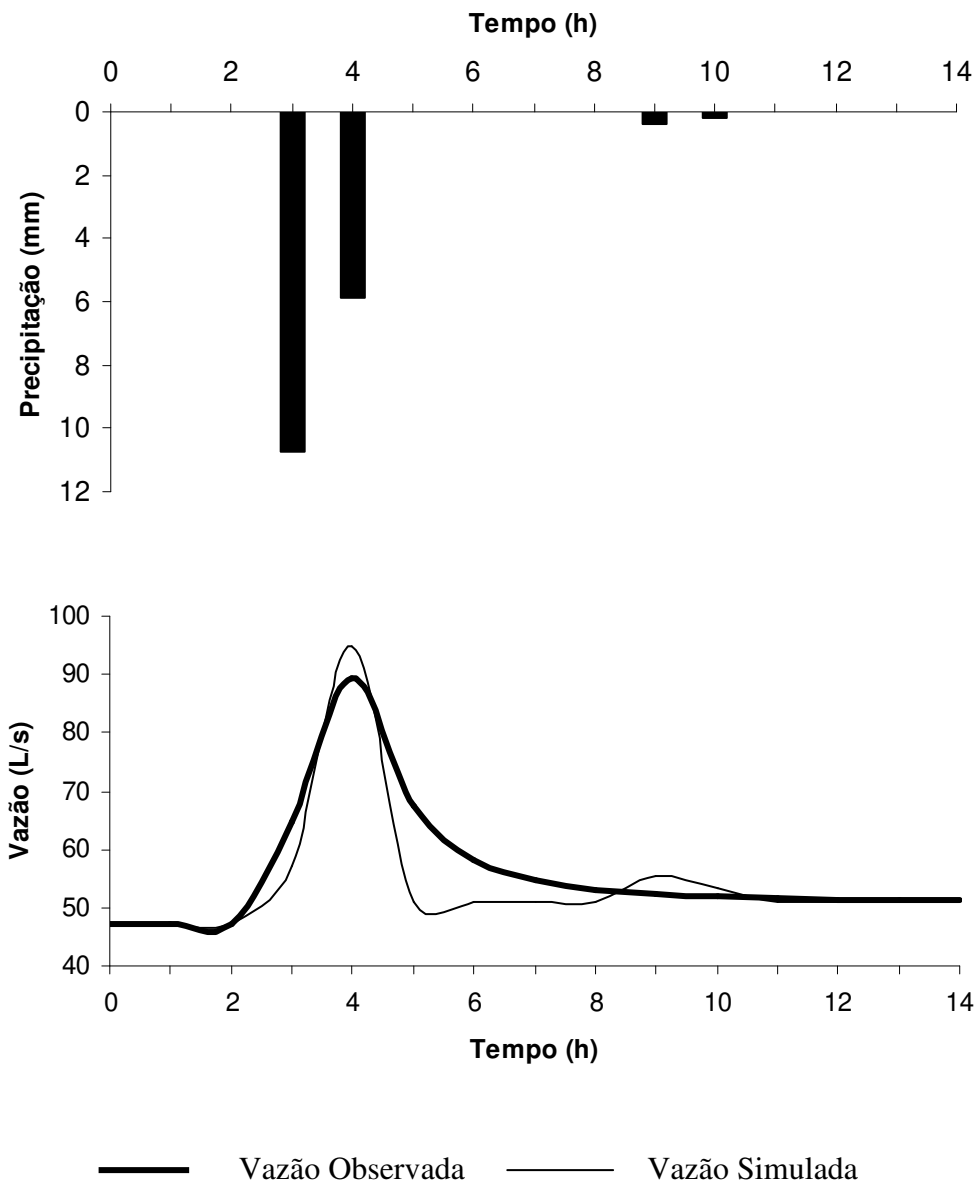


**Figura 147** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 1 (13/2/1999 a 14/2/1999) utilizado no processo de calibração do modelo TOPMODEL aplicado em conjunto a um modelo de interceptação vegetal, considerando a hipótese H1 de distribuição da precipitação interceptada.

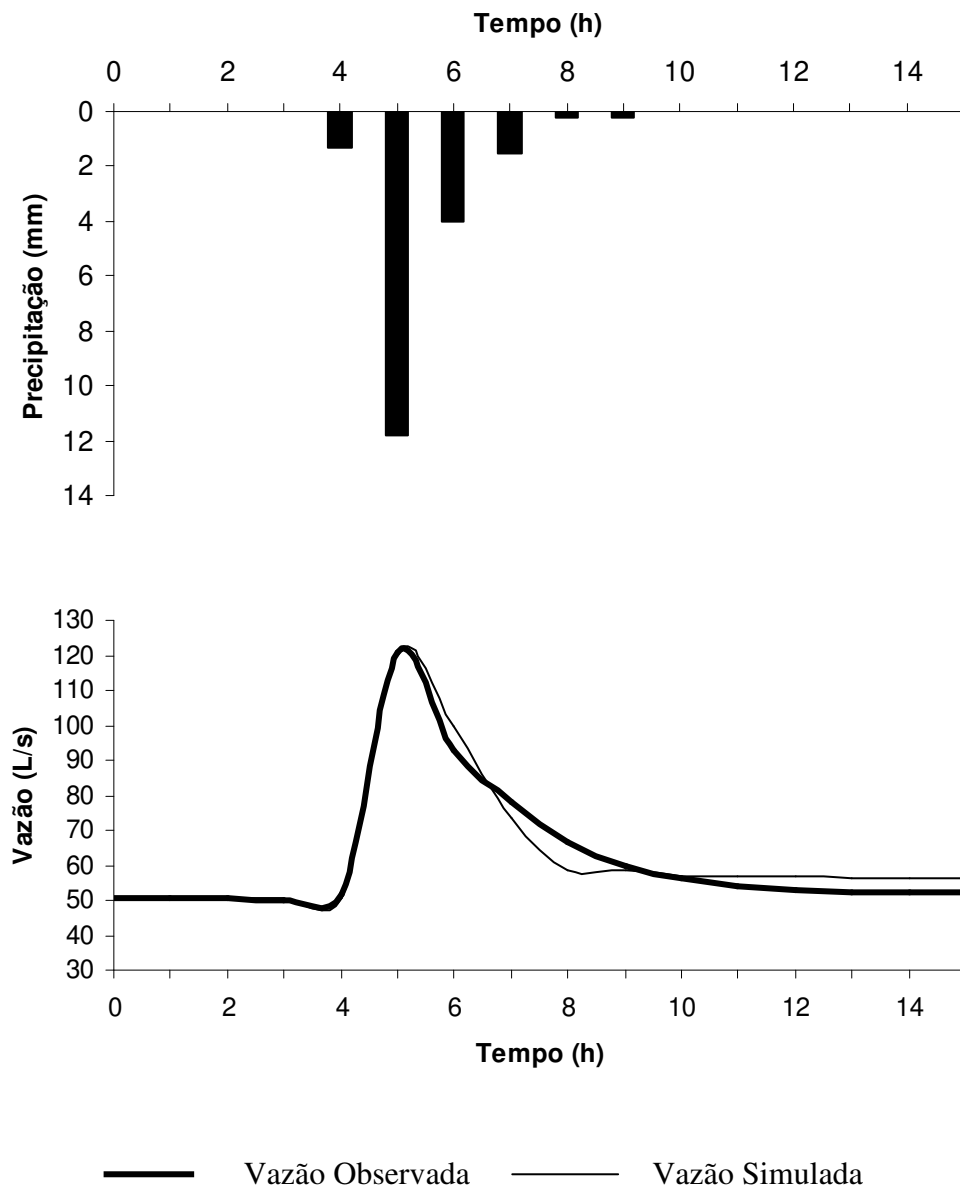


**Figura 148** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 2 (16/1/2000 a 17/1/2000) utilizado no processo de calibração do modelo TOPMODEL aplicado em conjunto a um modelo de interceptação vegetal, considerando a hipótese H1 de distribuição da precipitação interceptada.

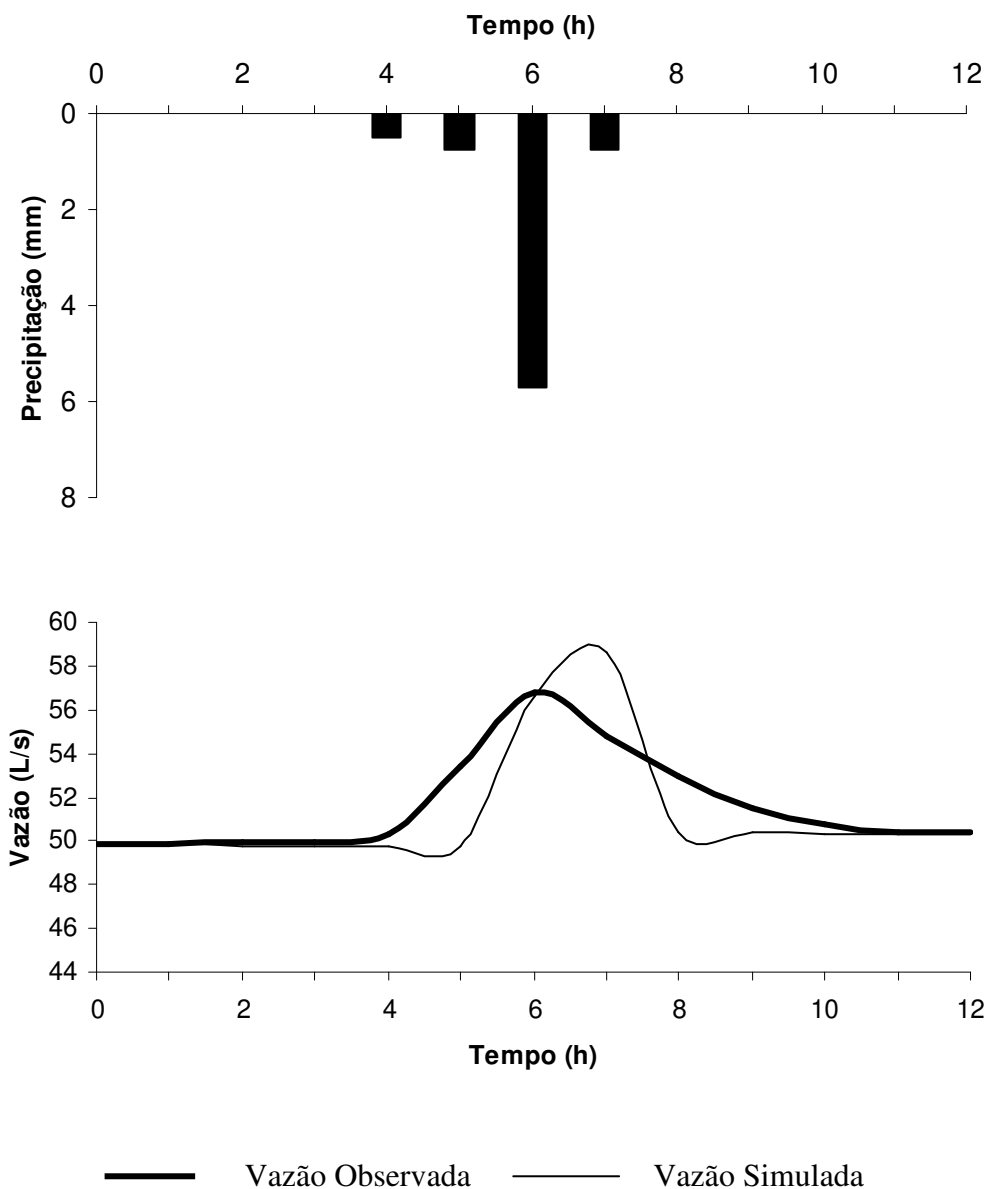




**Figura 149** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 3 (05/3/2001 a 06/3/2001) utilizado no processo de calibração do modelo TOPMODEL aplicado em conjunto a um modelo de interceptação vegetal, considerando a hipótese H1 de distribuição da precipitação interceptada.

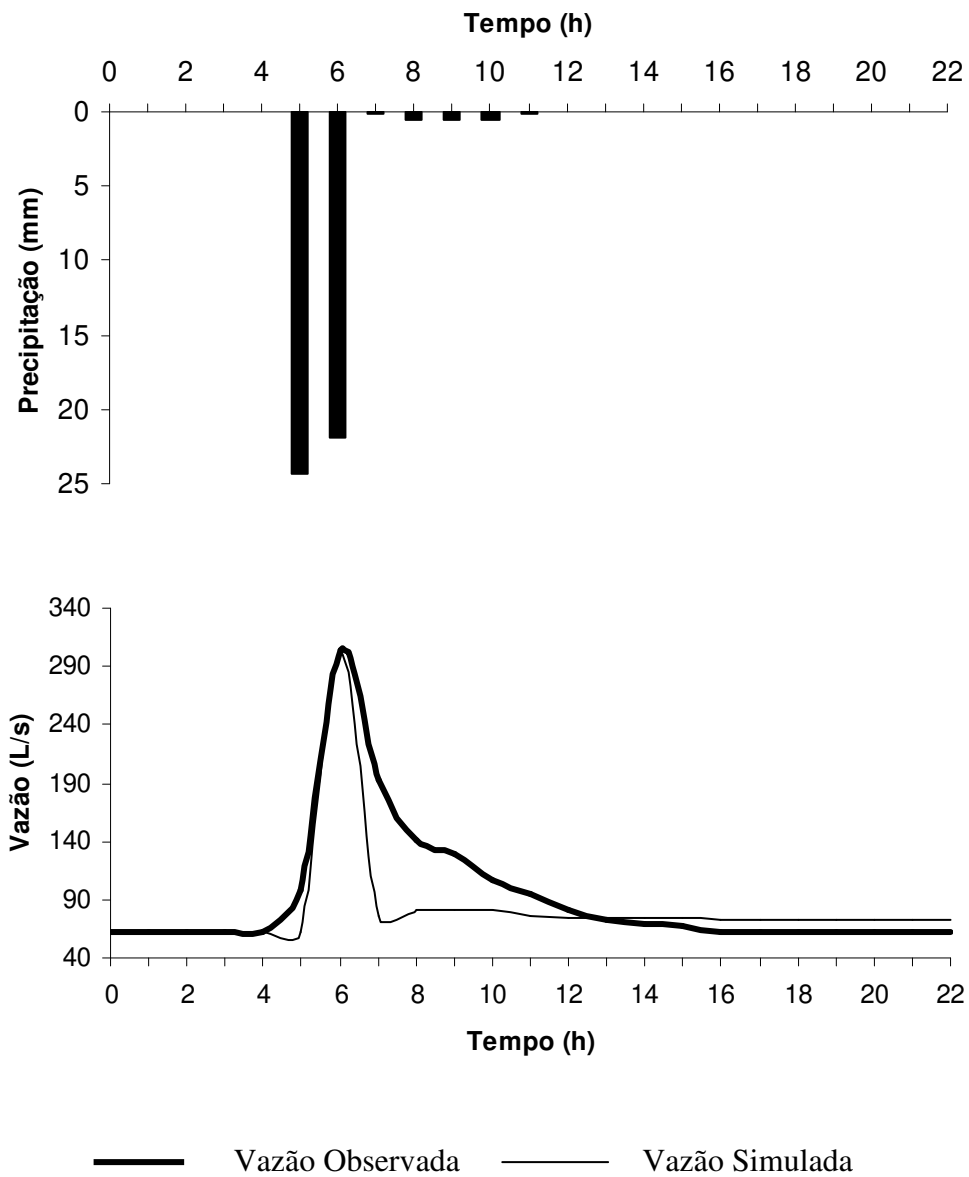


**Figura 150** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 4 (08/3/2001 a 09/3/2001) utilizado no processo de calibração do modelo TOPMODEL aplicado em conjunto a um modelo de interceptação vegetal, considerando a hipótese H1 de distribuição da precipitação interceptada.

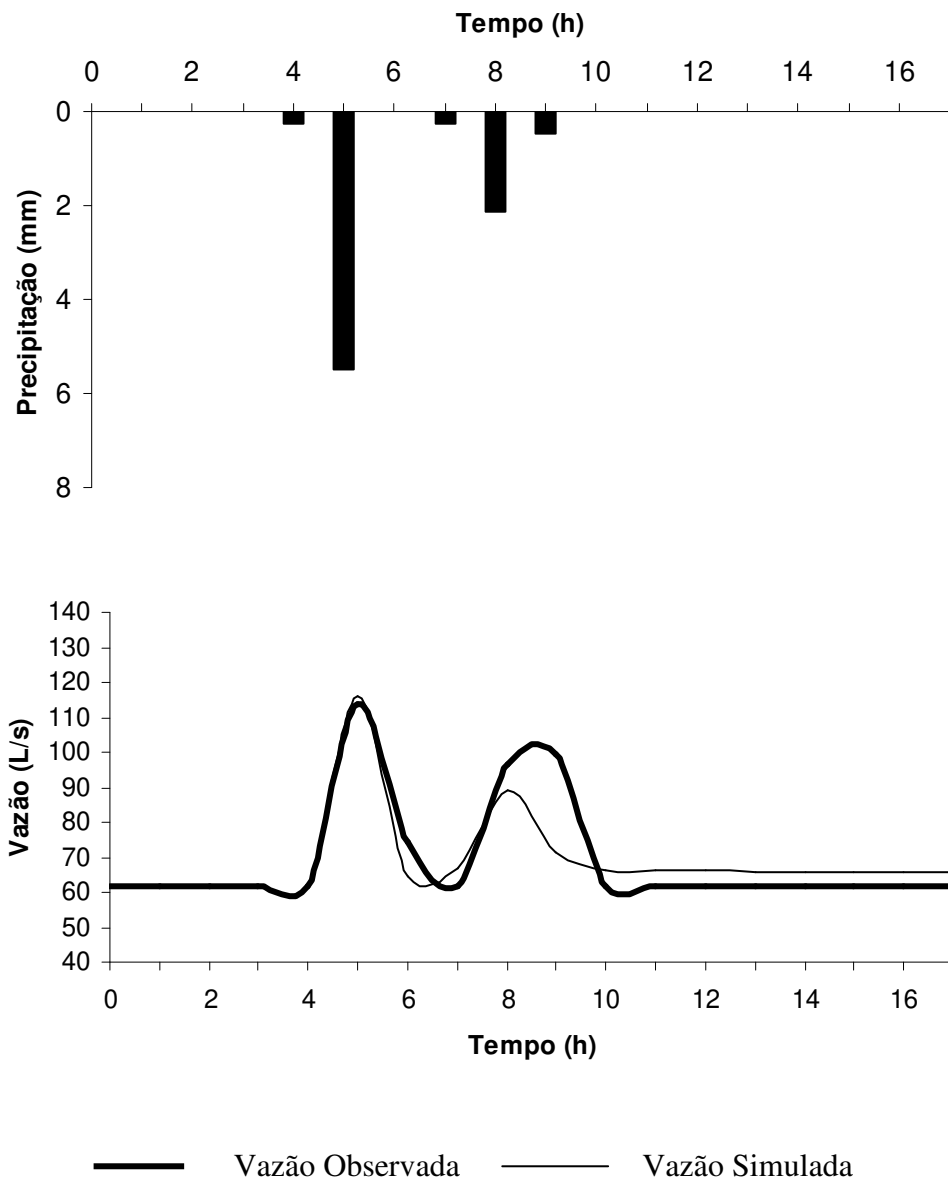


**Figura 151** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 5 (10/3/2001) utilizado no processo de calibração do modelo TOPMODEL aplicado em conjunto a um modelo de interceptação vegetal, considerando a hipótese H1 de distribuição da precipitação interceptada.

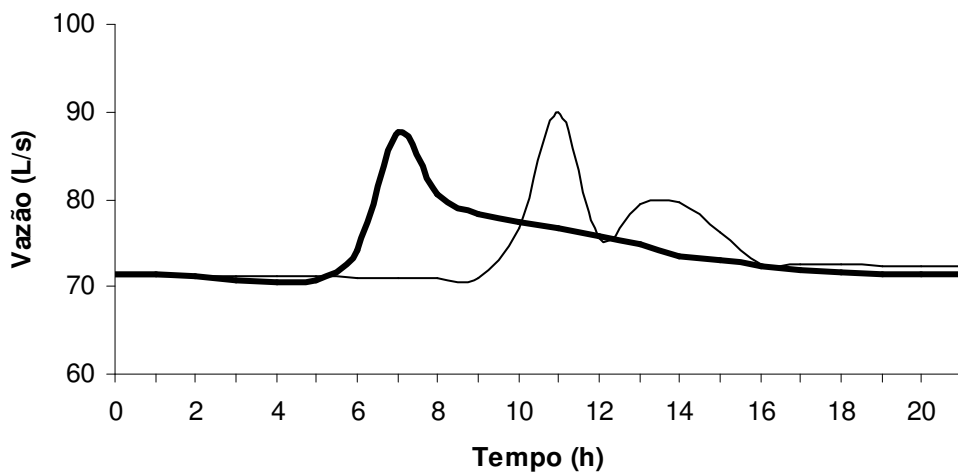
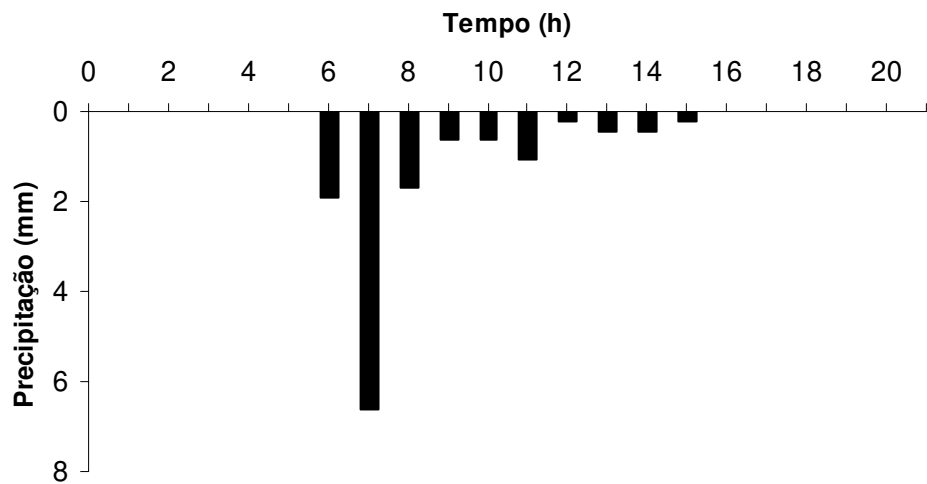
**APÊNDICE B.1.2 – Aplicação do modelo TOPMODEL em conjunto com um modelo de interceptação vegetal considerando a hipótese H1 de distribuição da interceptação -  
Eventos de validação**



**Figura 152** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 1 (20/2/1999 a 21/2/1999) utilizado no processo de validação do modelo TOPMODEL aplicado em conjunto a um modelo de interceptação vegetal, considerando a hipótese H1 de distribuição da precipitação interceptada.



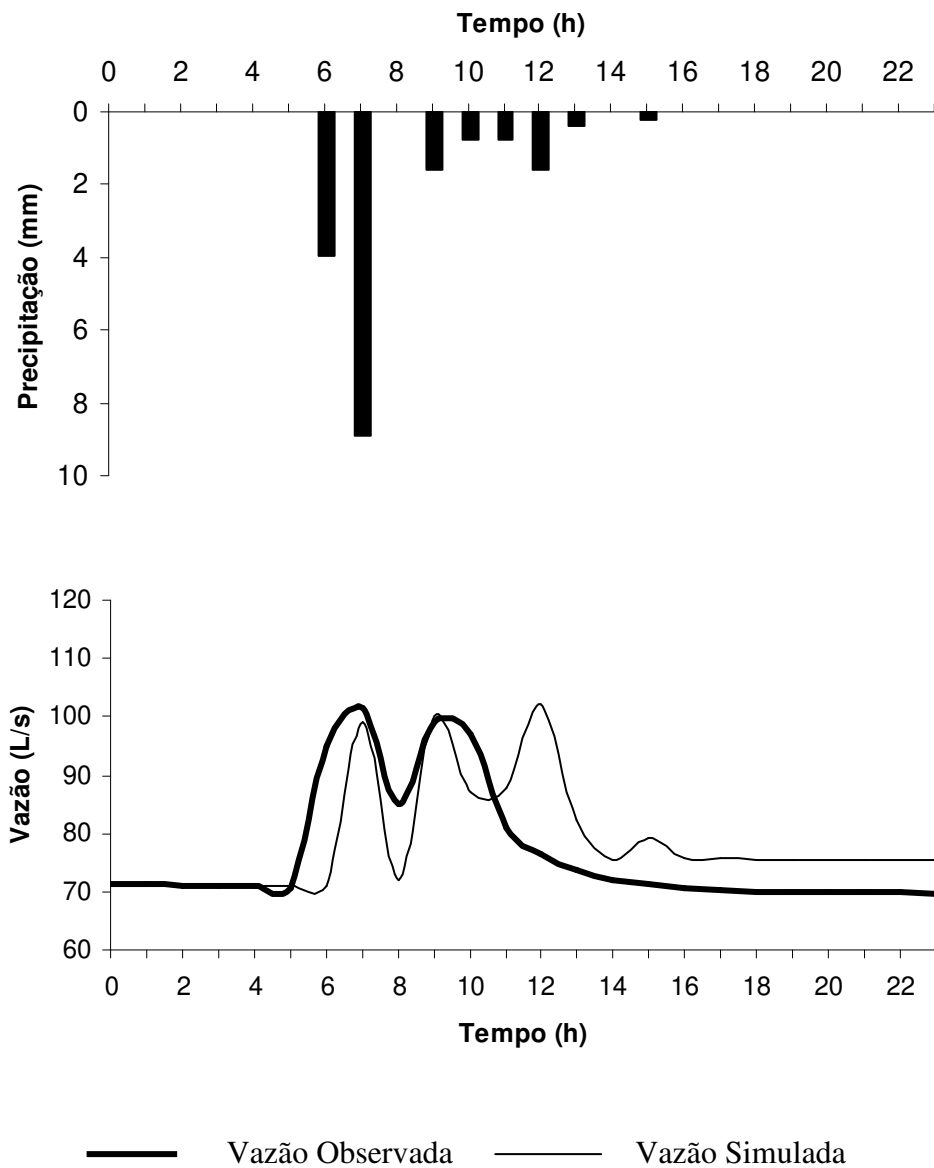
**Figura 153** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 2 (27/2/1999) 28/2/1999) utilizado no processo de validação do modelo TOPMODEL aplicado em conjunto a um modelo de interceptação vegetal, considerando a hipótese H1 de distribuição da precipitação interceptada.




---

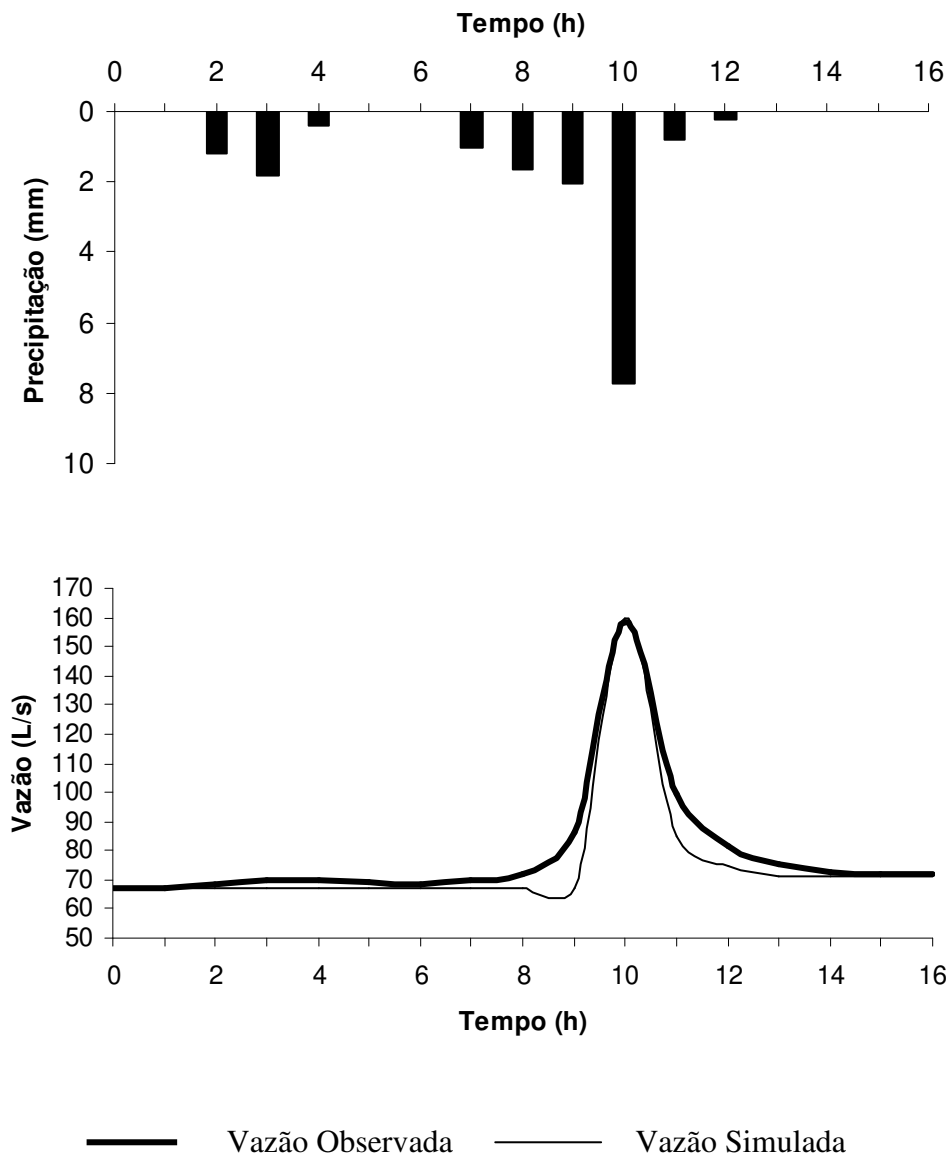
Vazão Observada
  Vazão Simulada

**Figura 154** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 3 (10/12/1999 a 11/12/1999) utilizado no processo de validação do modelo TOPMODEL aplicado em conjunto a um modelo de interceptação vegetal, considerando a hipótese H1 de distribuição da precipitação interceptada.

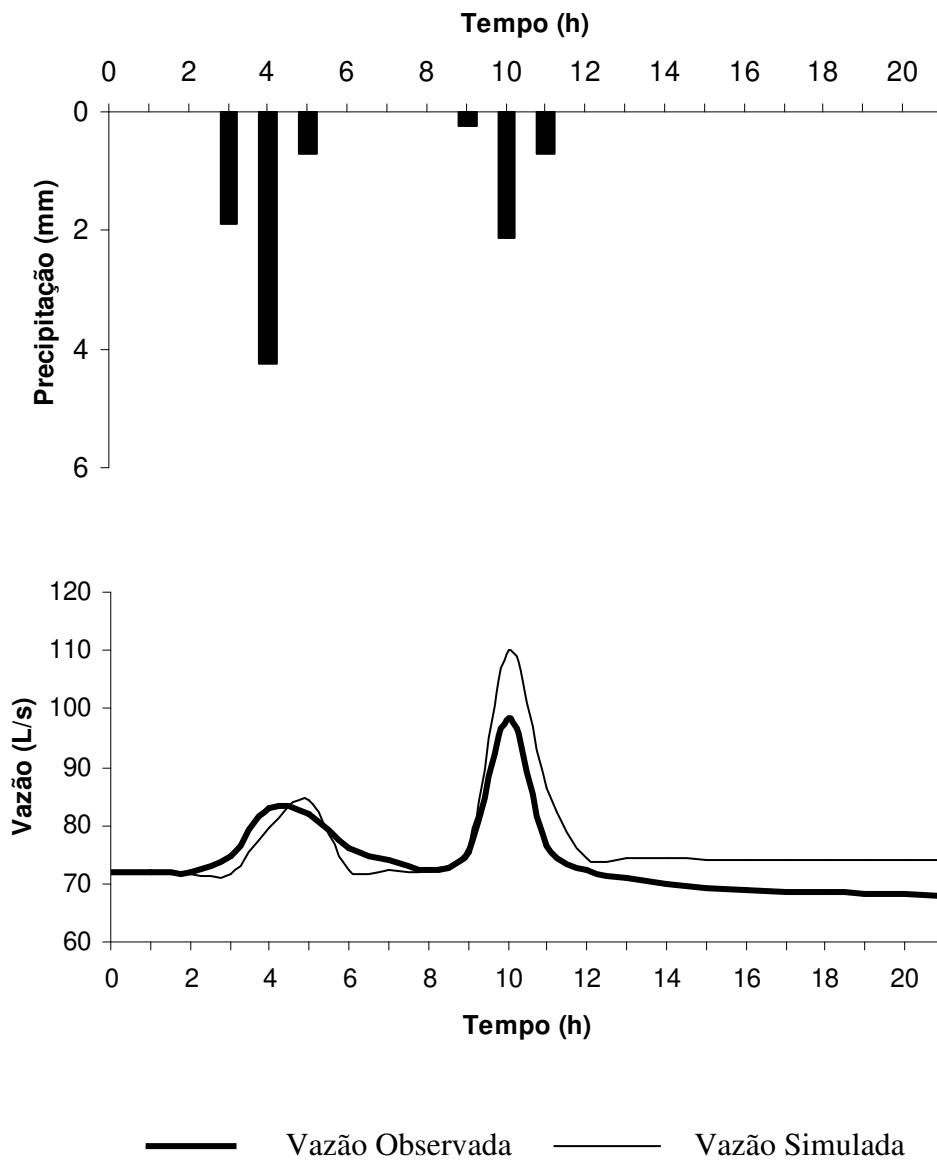


**Figura 155** - Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 4 (11/12/1999 a 12/12/1999) utilizado no processo de validação do modelo TOPMODEL aplicado em conjunto a um modelo de interceptação vegetal, considerando a hipótese H1 de distribuição da precipitação interceptada.

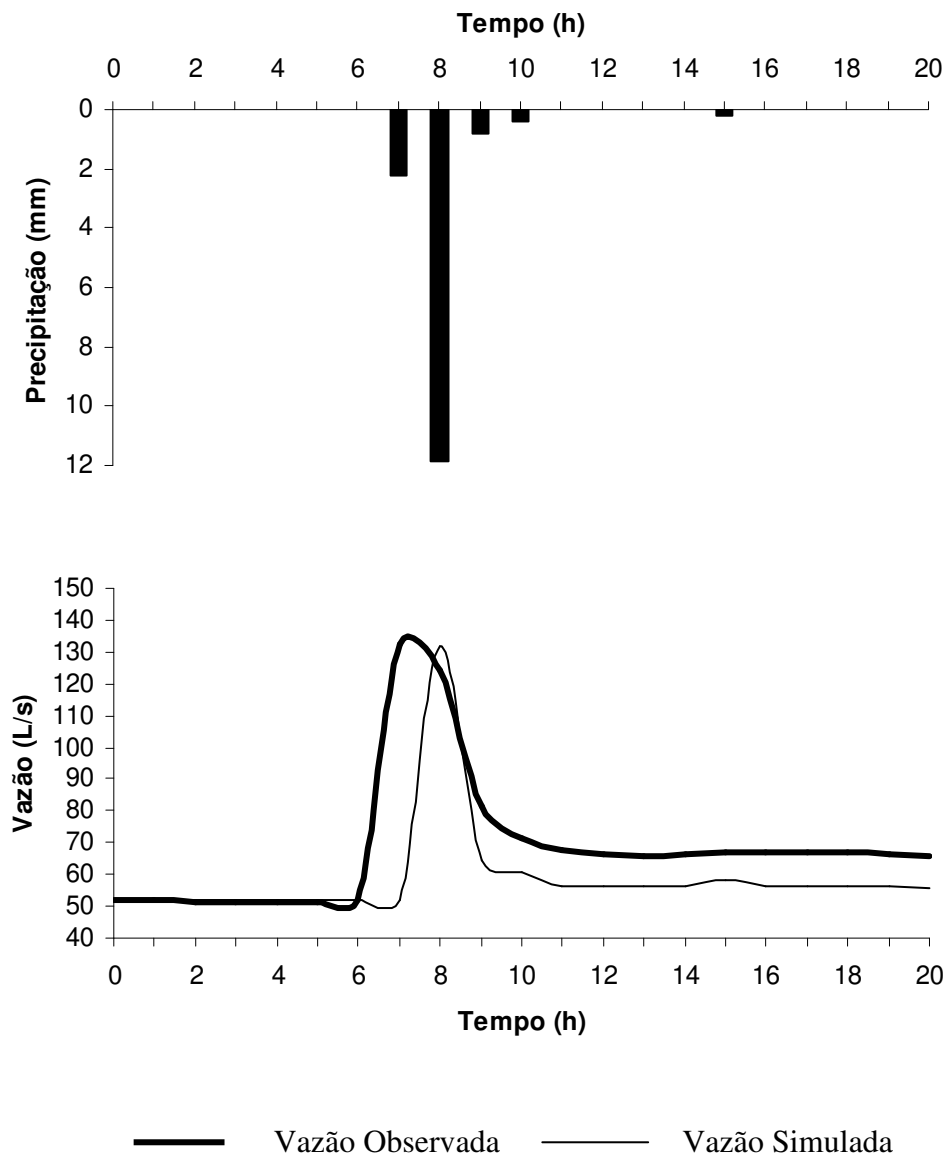




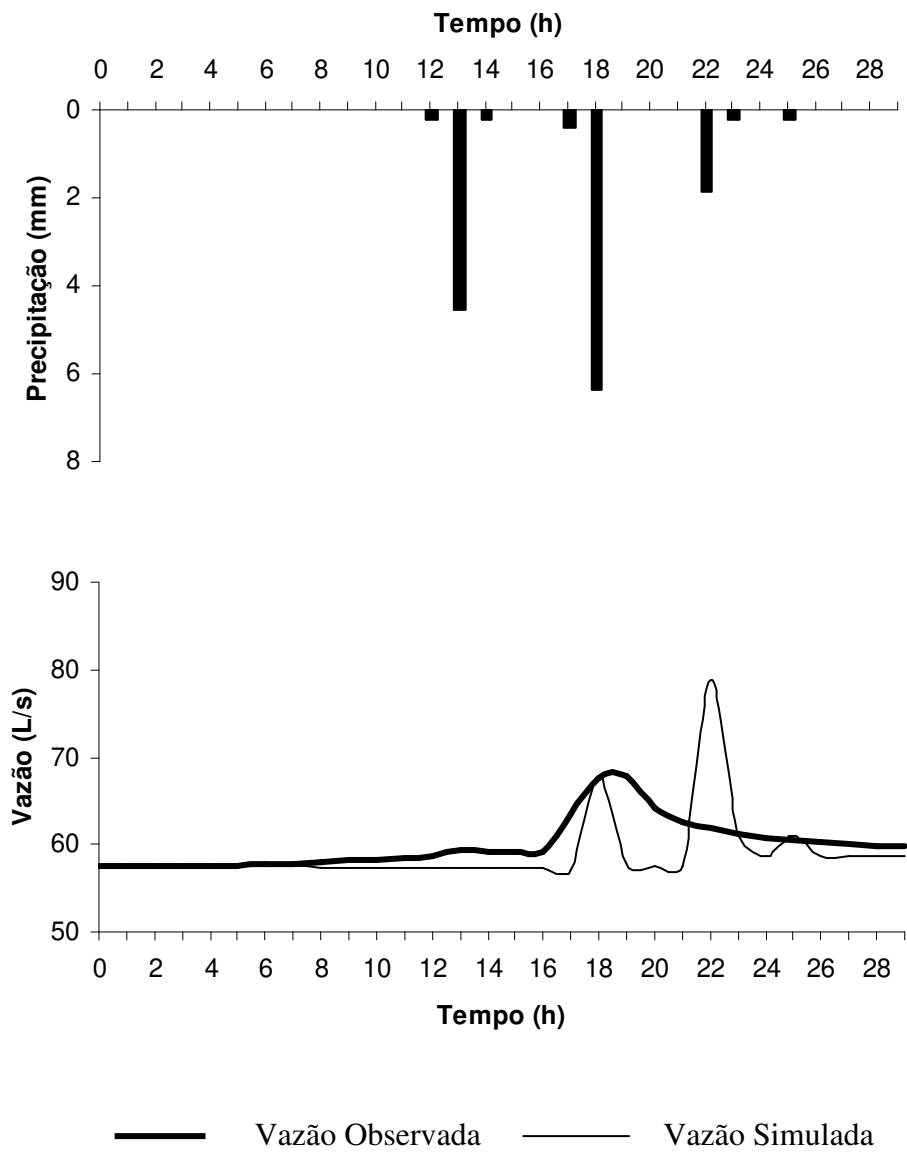
**Figura 156** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 5 (13/12/1999 a 14/12/1999) utilizado no processo de validação do modelo TOPMODEL aplicado em conjunto a um modelo de interceptação vegetal, considerando a hipótese H1 de distribuição da precipitação interceptada.



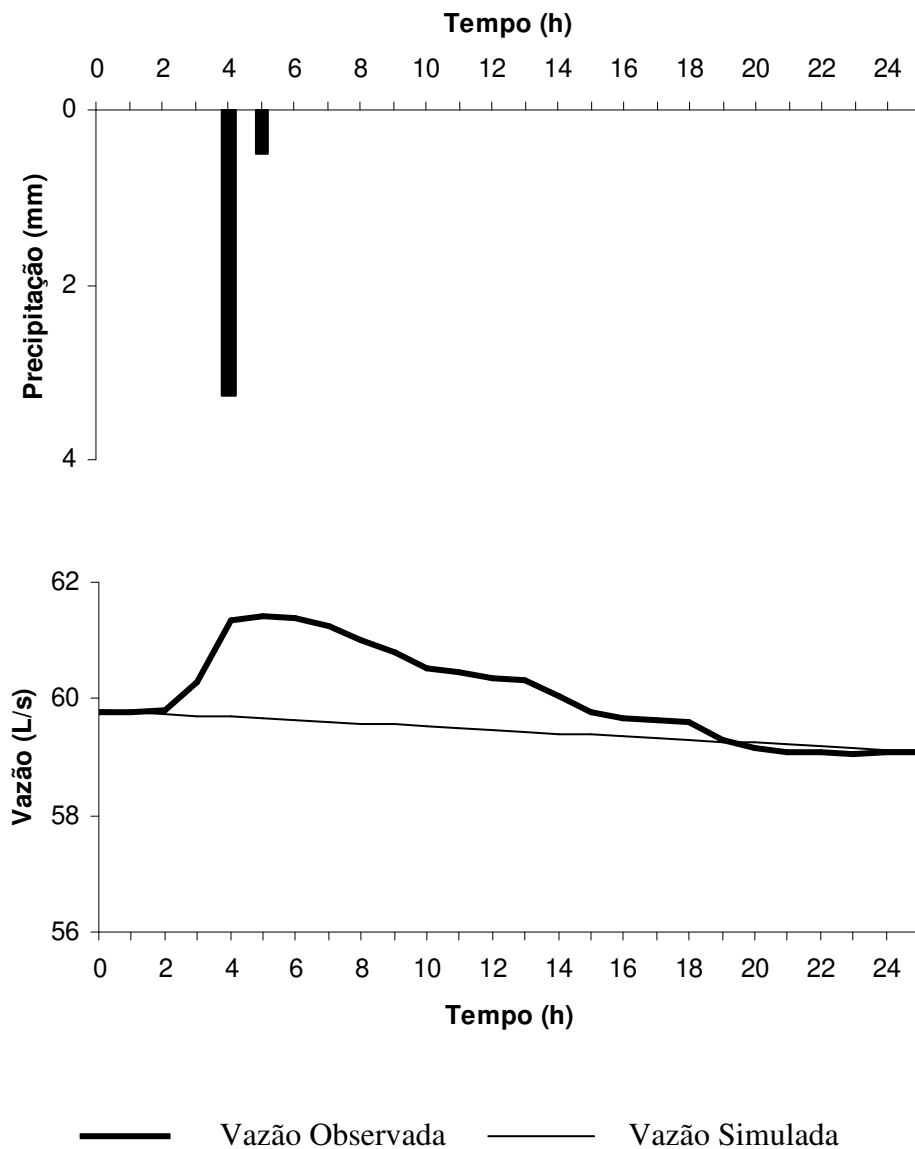
**Figura 157** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 6 (14/12/1999) utilizado no processo de validação do modelo TOPMODEL aplicado em conjunto a um modelo de interceptação vegetal, considerando a hipótese H1 de distribuição da precipitação interceptada.



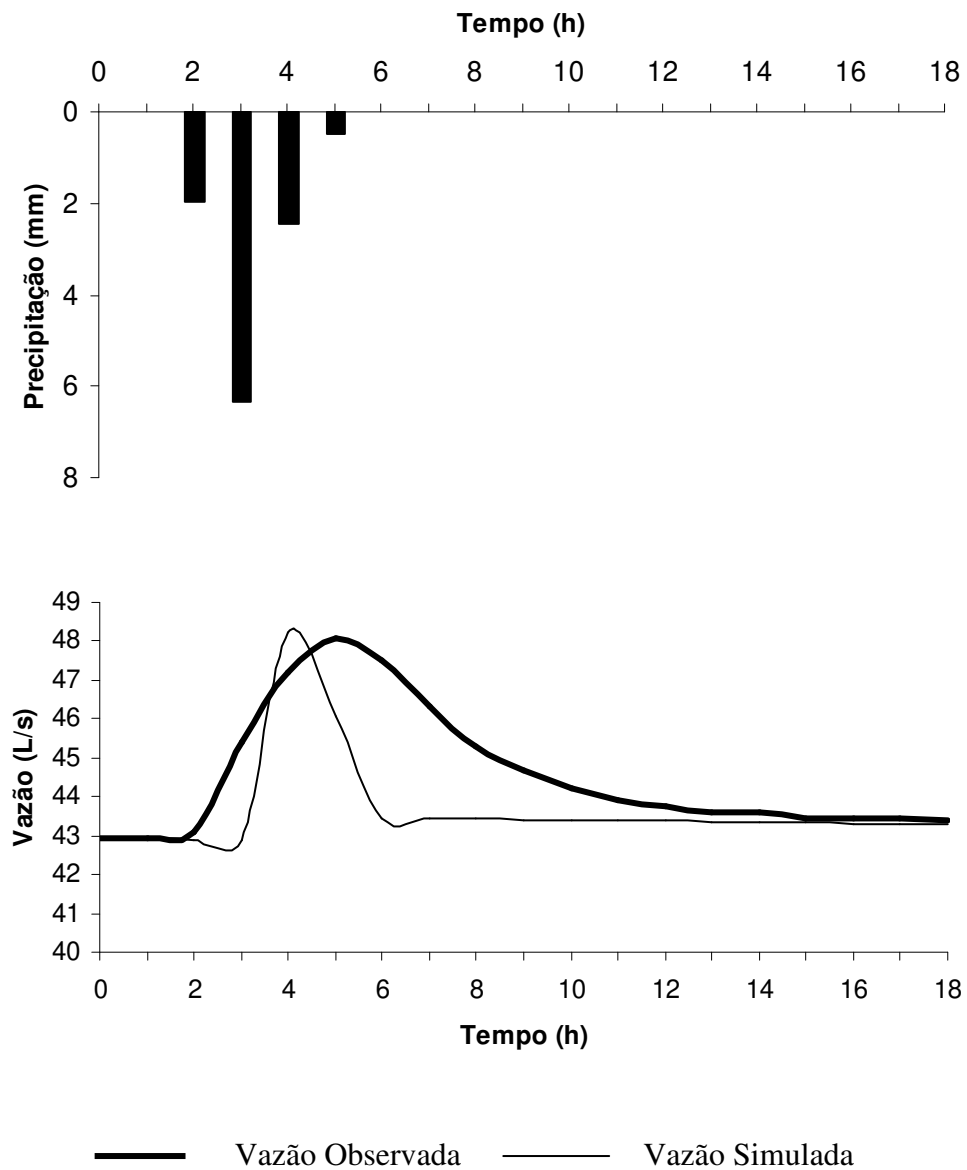
**Figura 158** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 7 (17/1/2000 a 18/1/2000) utilizado no processo de validação do modelo TOPMODEL aplicado em conjunto a um modelo de interceptação vegetal, considerando a hipótese H1 de distribuição da precipitação interceptada.



**Figura 159** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 8 (25/1/2000 a 26/1/2000) utilizado no processo de validação do modelo TOPMODEL aplicado em conjunto a um modelo de interceptação vegetal, considerando a hipótese H1 de distribuição da precipitação interceptada.



**Figura 160** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 9 (26/1/2000 a 27/1/2000) utilizado no processo de validação do modelo TOPMODEL aplicado em conjunto a um modelo de interceptação vegetal, considerando a hipótese H1 de distribuição da precipitação interceptada.

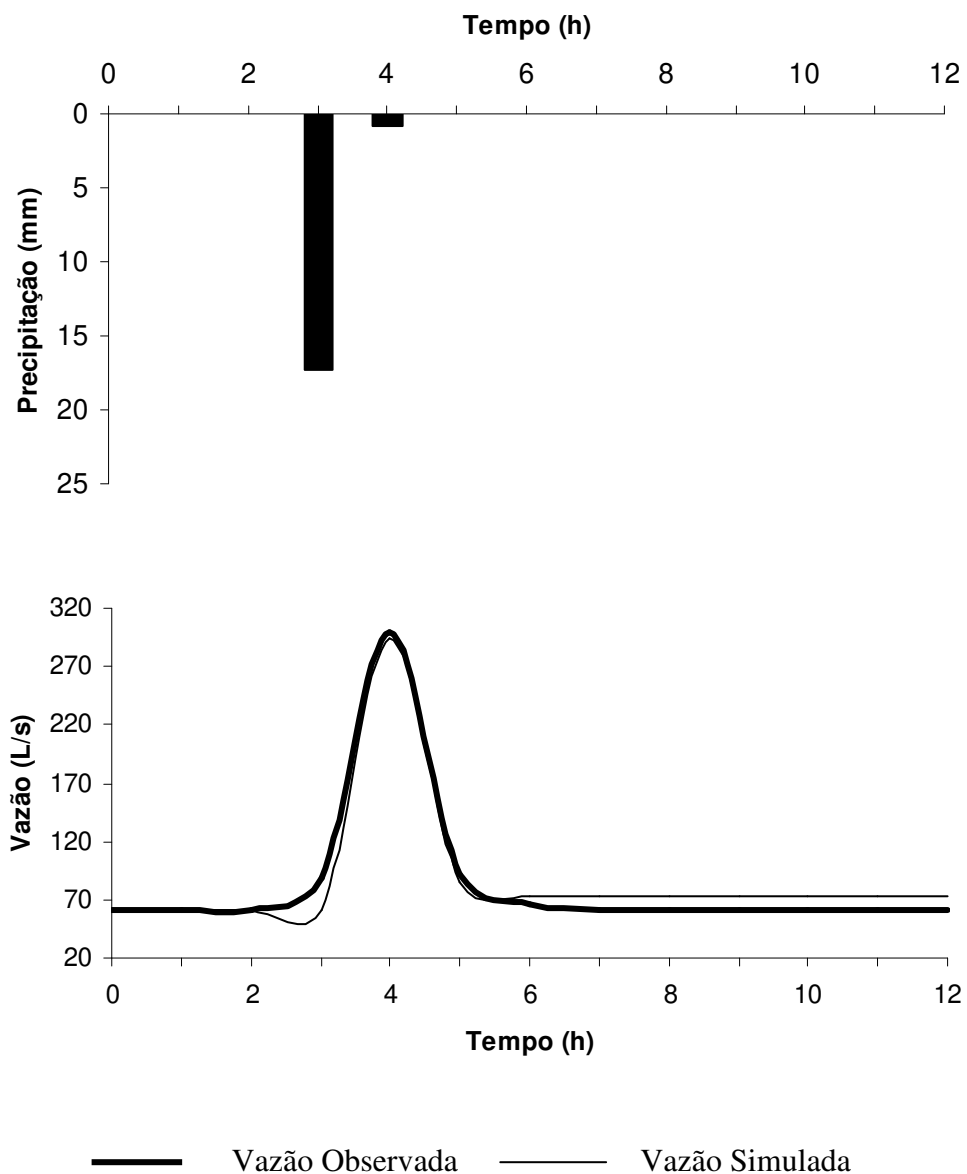


**Figura 161** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 10 (25/6/2000 a 26/6/2000) utilizado no processo de validação do modelo TOPMODEL aplicado em conjunto a um modelo de interceptação vegetal, considerando a hipótese H1 de distribuição da precipitação interceptada.

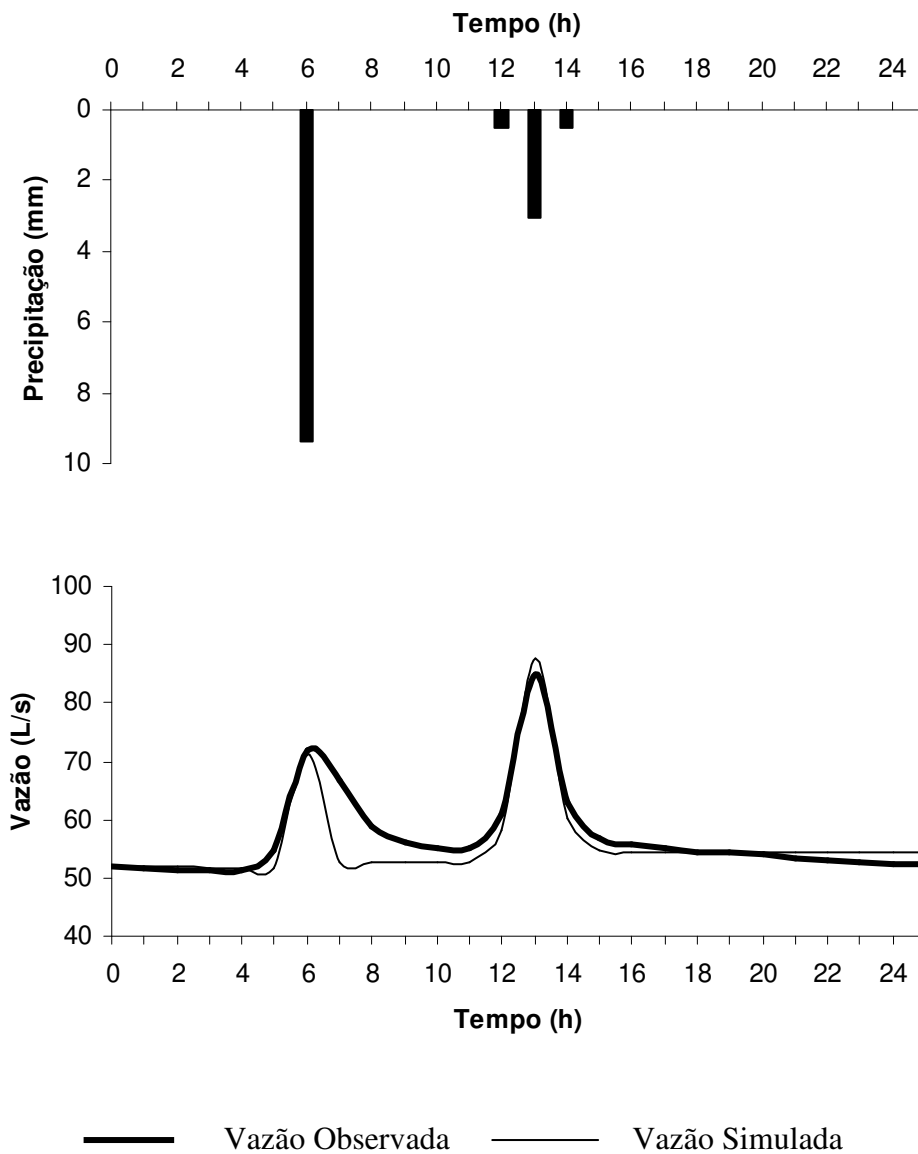
**APÊNDICE B.2 – Aplicação do modelo TOPMODEL em conjunto a um modelo de interceptação vegetal considerando a hipótese H2 de distribuição da interceptação**

**APÊNDICE B.2.1 – Aplicação do modelo TOPMODEL em conjunto a um modelo de interceptação vegetal considerando a hipótese H2 de distribuição da interceptação –  
Eventos de calibração**

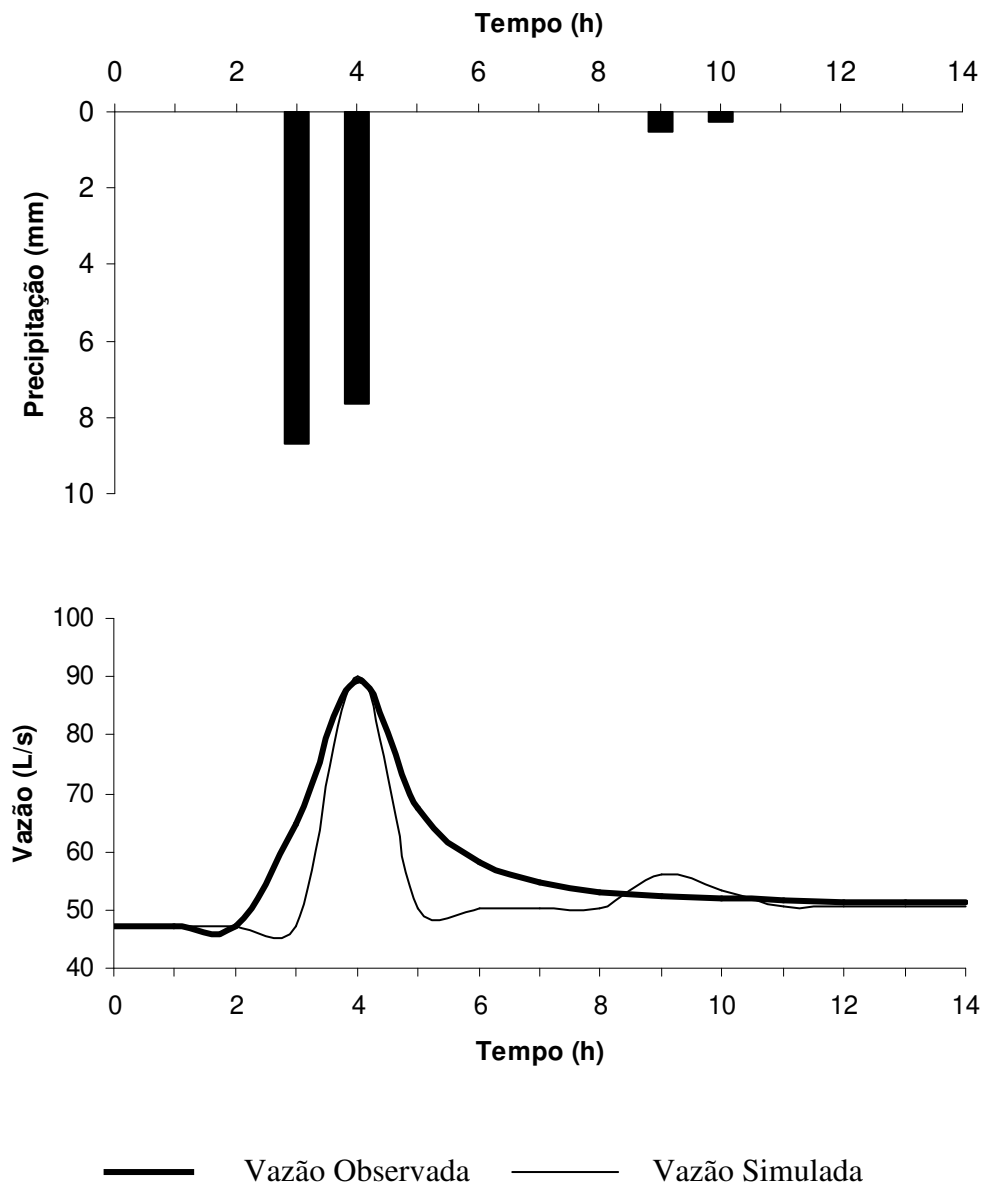




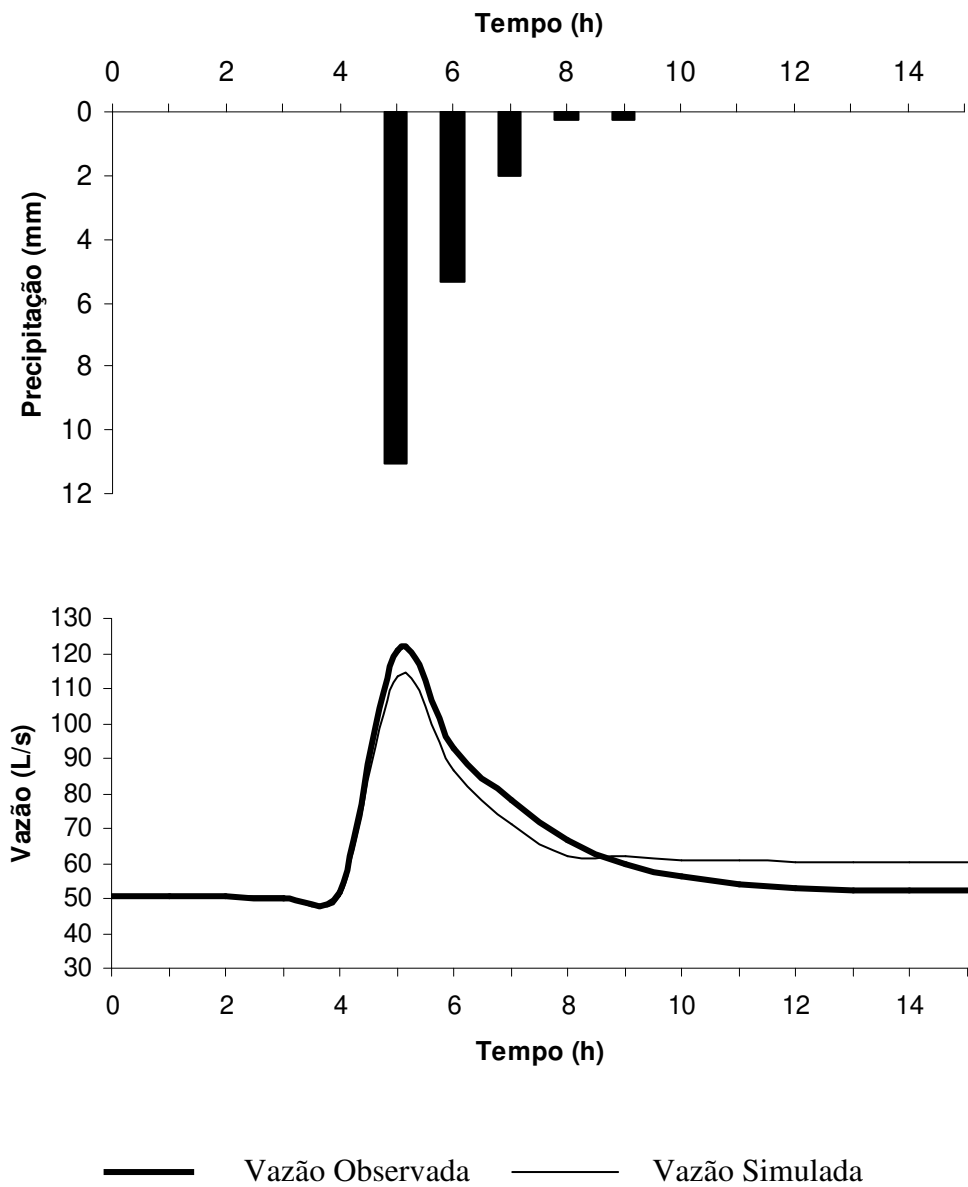
**Figura 162** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 1 (13/2/1999 a 14/2/1999) utilizado no processo de calibração do modelo TOPMODEL aplicado em conjunto a um modelo de interceptação vegetal, considerando a hipótese H2 de distribuição da precipitação interceptada.



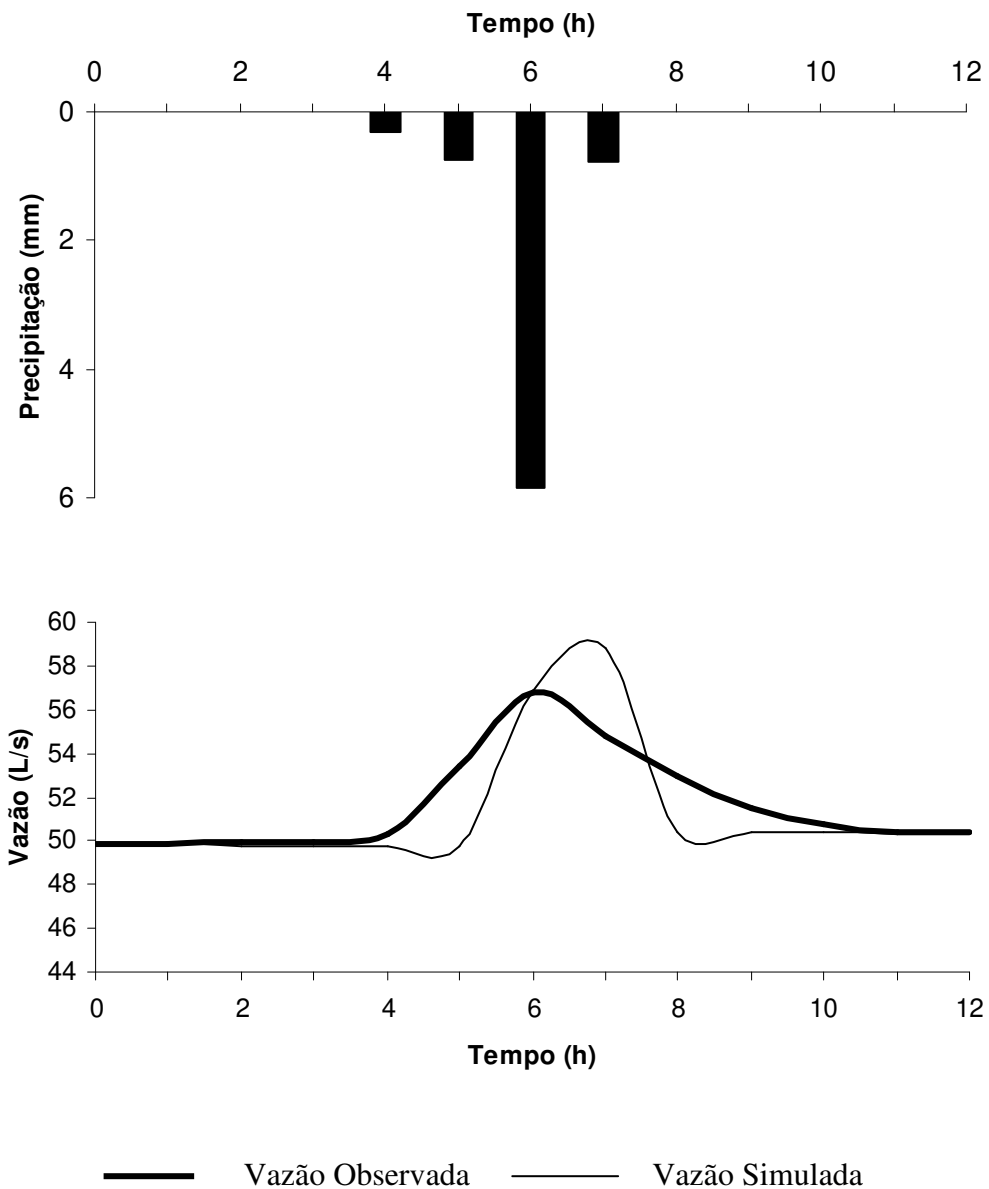
**Figura 163** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 2 (16/1/2000 a 17/1/2000) utilizado no processo de calibração do modelo TOPMODEL aplicado em conjunto a um modelo de interceptação vegetal, considerando a hipótese H2 de distribuição da precipitação interceptada.



**Figura 164** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 3 (05/3/2001 a 06/3/2001) utilizado no processo de calibração do modelo TOPMODEL aplicado em conjunto a um modelo de interceptação vegetal, considerando a hipótese H2 de distribuição da precipitação interceptada.

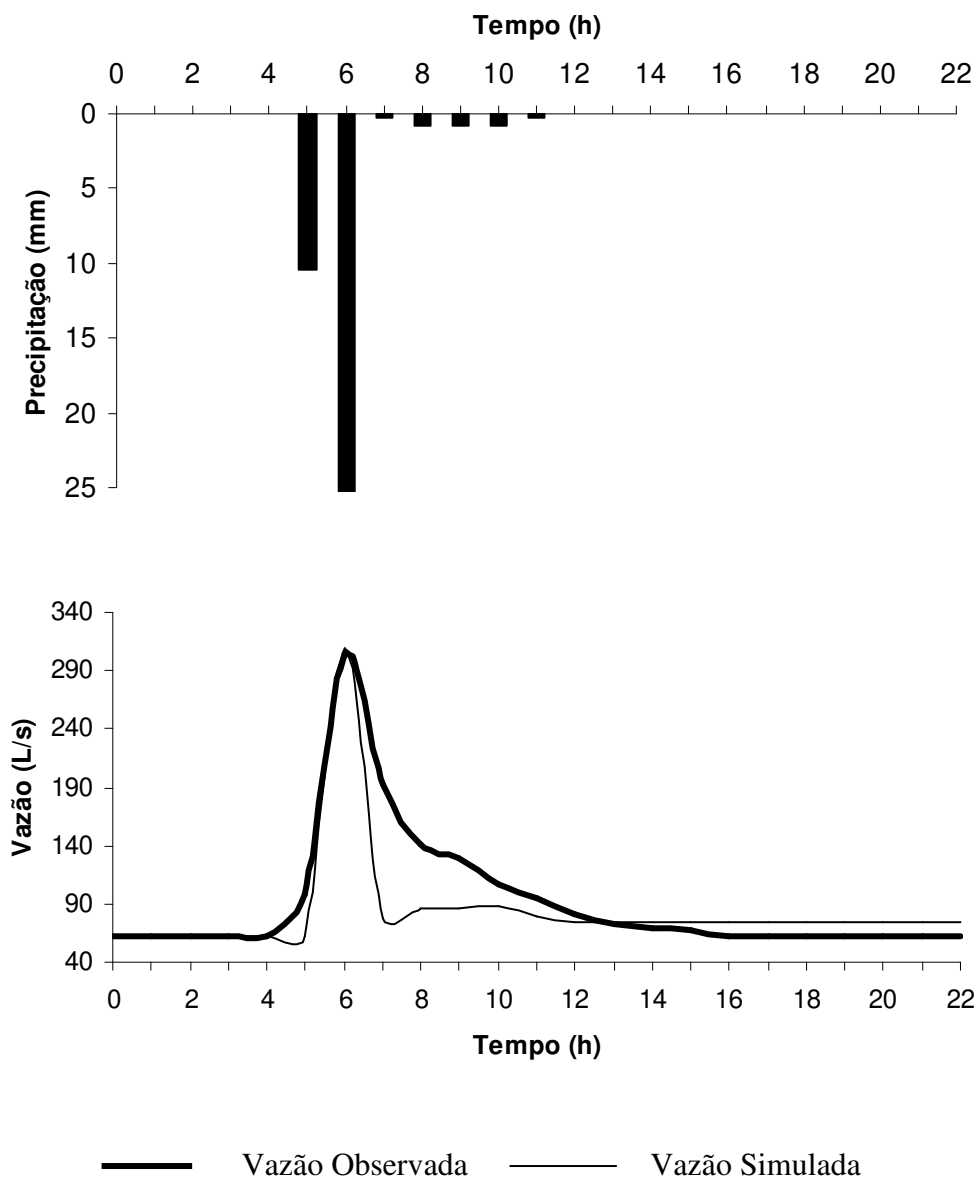


**Figura 165** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 4 (08/3/2001 a 09/3/2001) utilizado no processo de calibração do modelo TOPMODEL aplicado em conjunto a um modelo de interceptação vegetal, considerando a hipótese H2 de distribuição da precipitação interceptada.

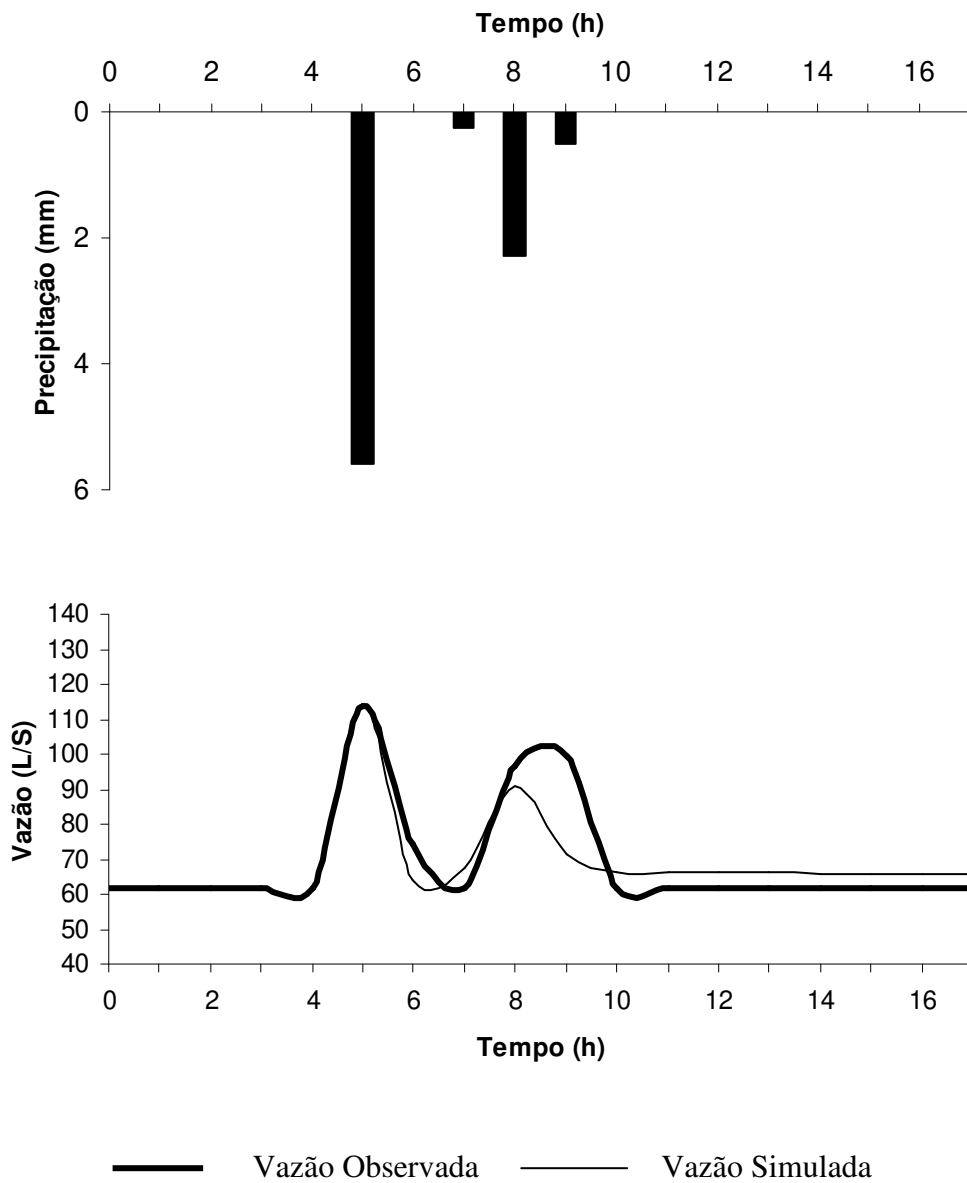


**Figura 166** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 5 (10/3/2001) utilizado no processo de calibração do modelo TOPMODEL aplicado em conjunto a um modelo de interceptação vegetal, considerando a hipótese H2 de distribuição da precipitação interceptada.

**APÊNDICE B.2.2 – Aplicação do modelo TOPMODEL em conjunto com um modelo de interceptação vegetal considerando a hipótese H2 de distribuição da interceptação -  
Eventos de validação**

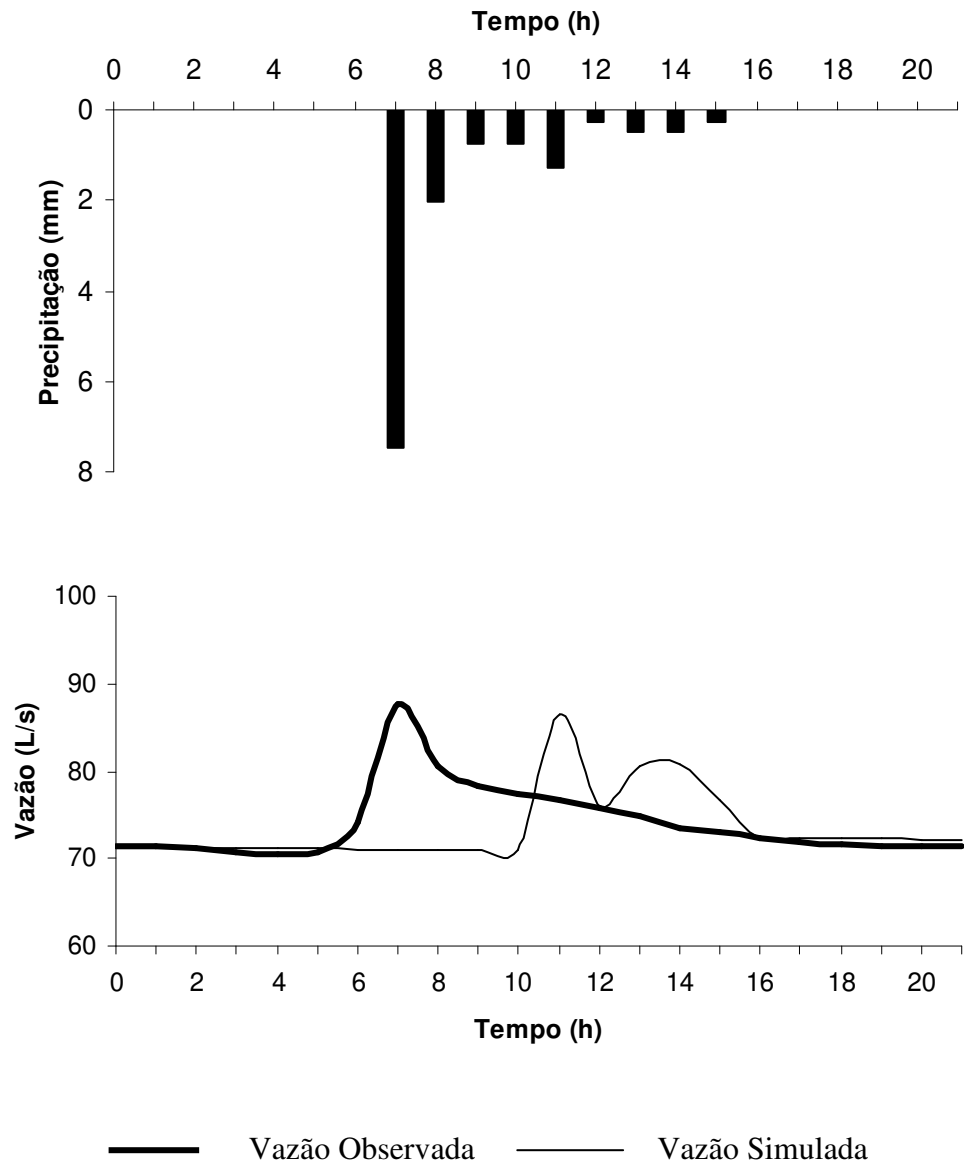


**Figura 167** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 1 (20/2/1999 a 21/2/1999) utilizado no processo de validação do modelo TOPMODEL aplicado em conjunto a um modelo de interceptação vegetal, considerando a hipótese H2 de distribuição da precipitação interceptada.

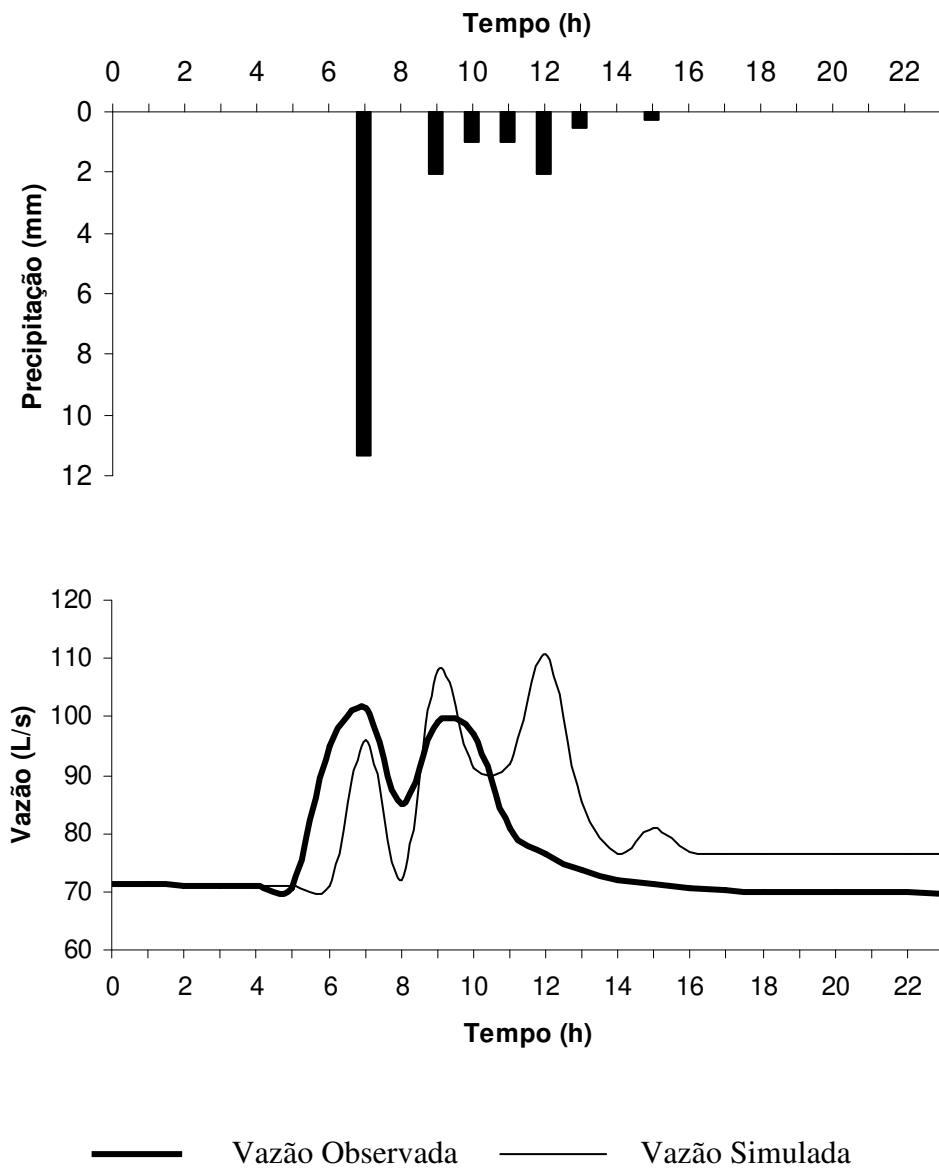


**Figura 168** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 2 (27/2/1999 a 28/2/1999) utilizado no processo de validação do modelo TOPMODEL aplicado em conjunto a um modelo de interceptação vegetal, considerando a hipótese H2 de distribuição da precipitação interceptada.

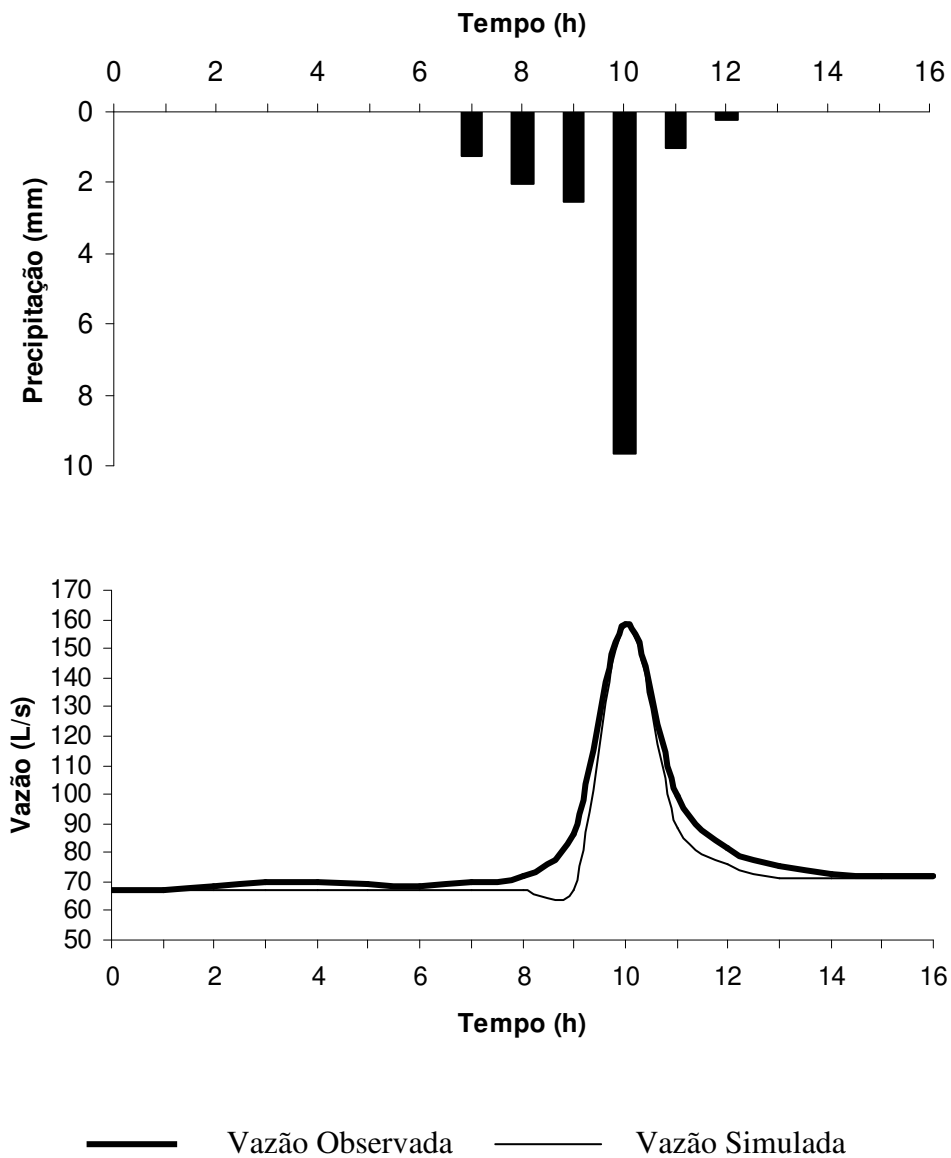




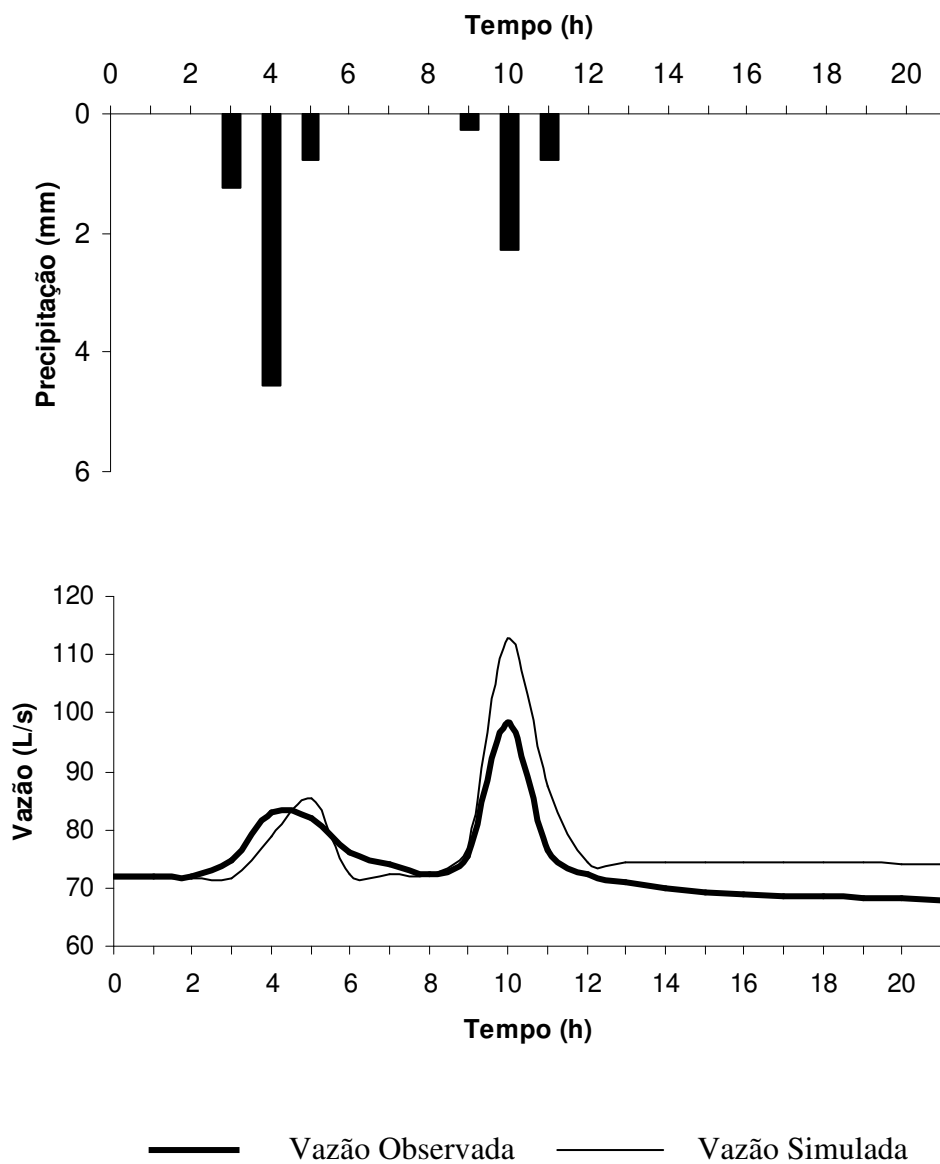
**Figura 169** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 3 (10/12/1999 a 11/12/1999) utilizado no processo de validação do modelo TOPMODEL aplicado em conjunto a um modelo de interceptação vegetal, considerando a hipótese H2 de distribuição da precipitação interceptada.



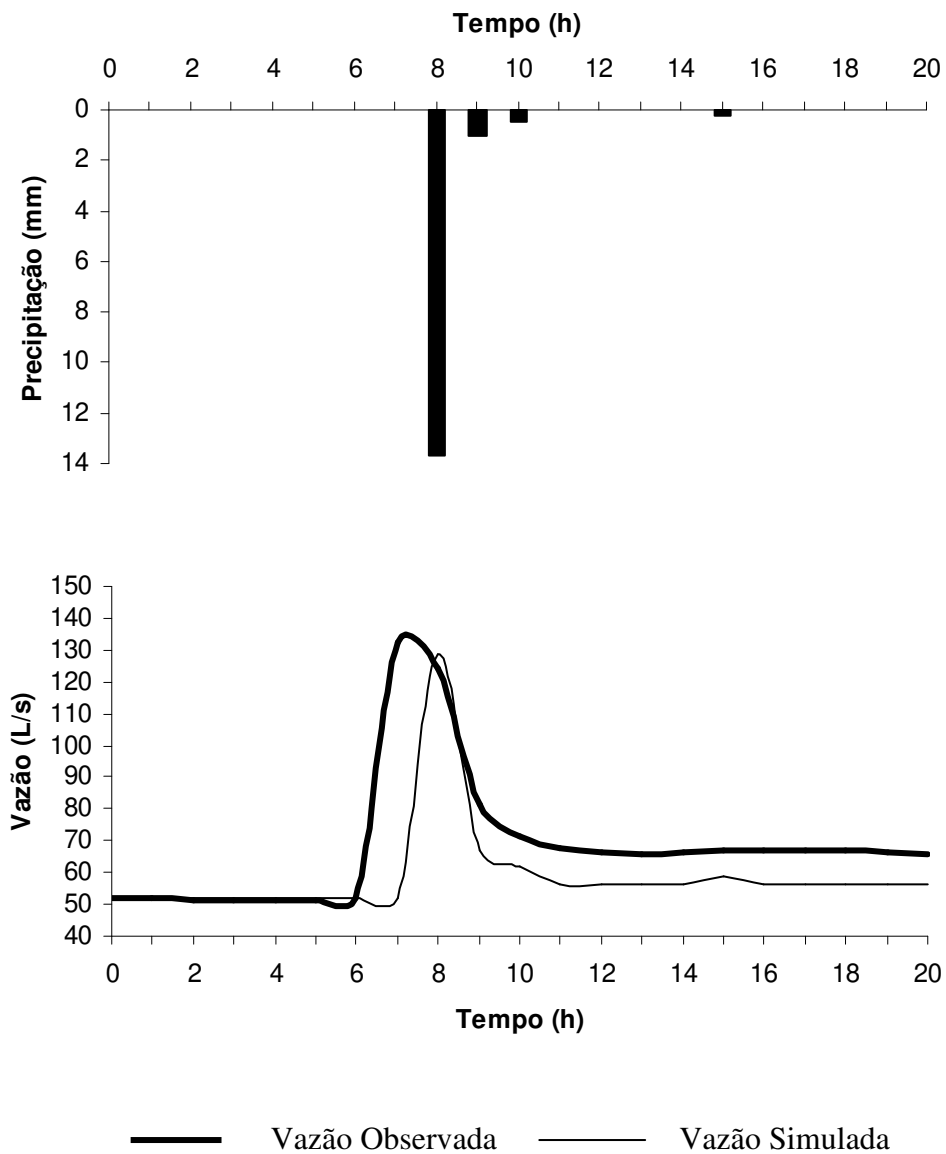
**Figura 170** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 4 (11/12/1999 a 12/12/1999) utilizado no processo de validação do modelo TOPMODEL aplicado em conjunto a um modelo de interceptação vegetal, considerando a hipótese H2 de distribuição da precipitação interceptada.



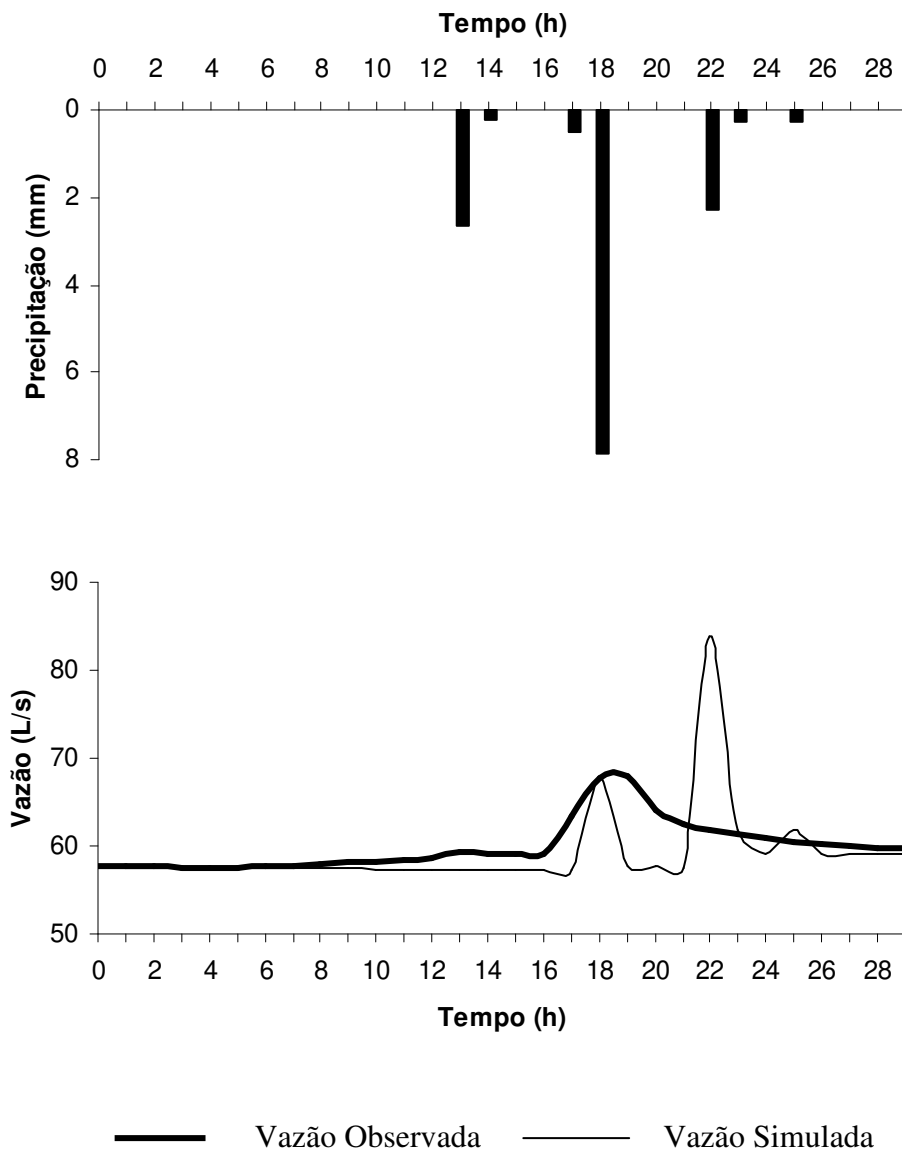
**Figura 171** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 5 (13/12/1999 a 14/12/1999) utilizado no processo de validação do modelo TOPMODEL aplicado em conjunto a um modelo de interceptação vegetal, considerando a hipótese H2 de distribuição da precipitação interceptada.



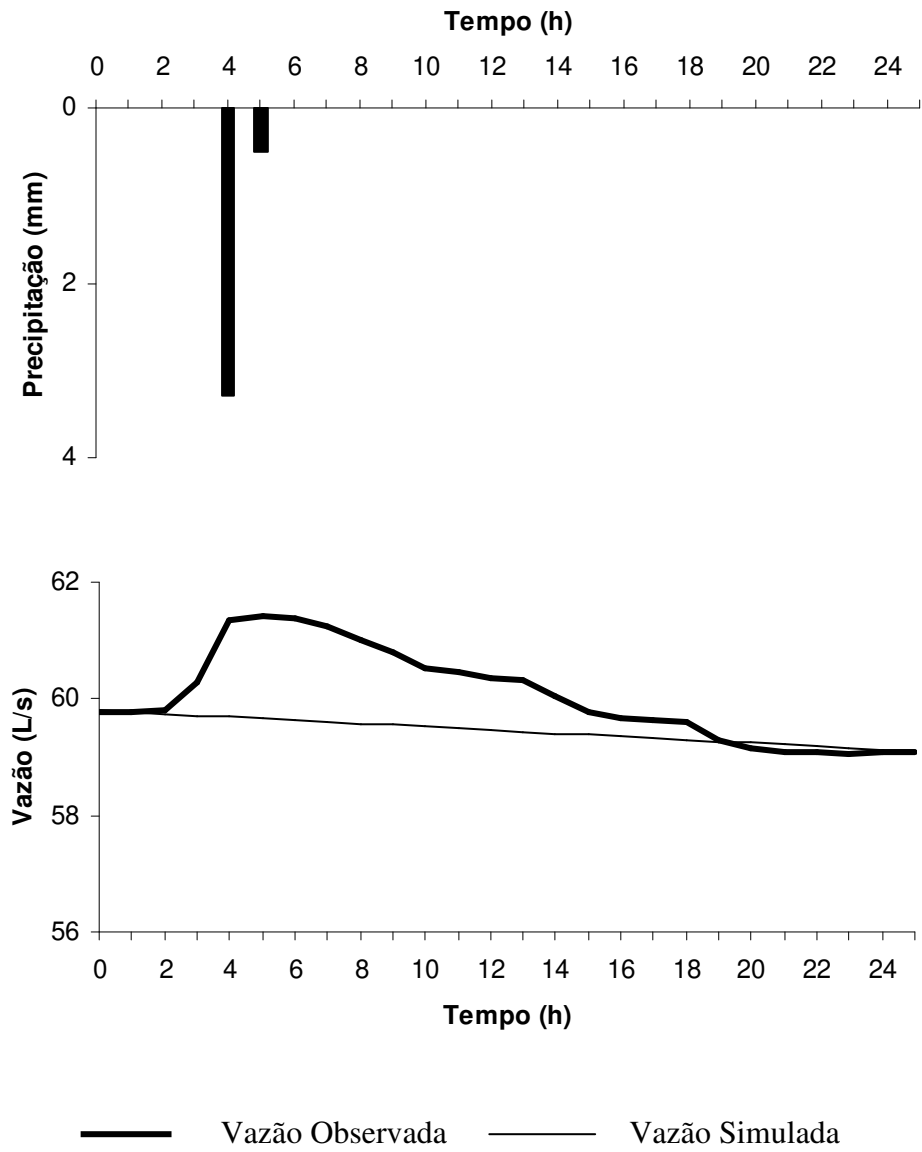
**Figura 172** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 6 (14/12/1999) utilizado no processo de validação do modelo TOPMODEL aplicado em conjunto a um modelo de interceptação vegetal, considerando a hipótese H2 de distribuição da precipitação interceptada.



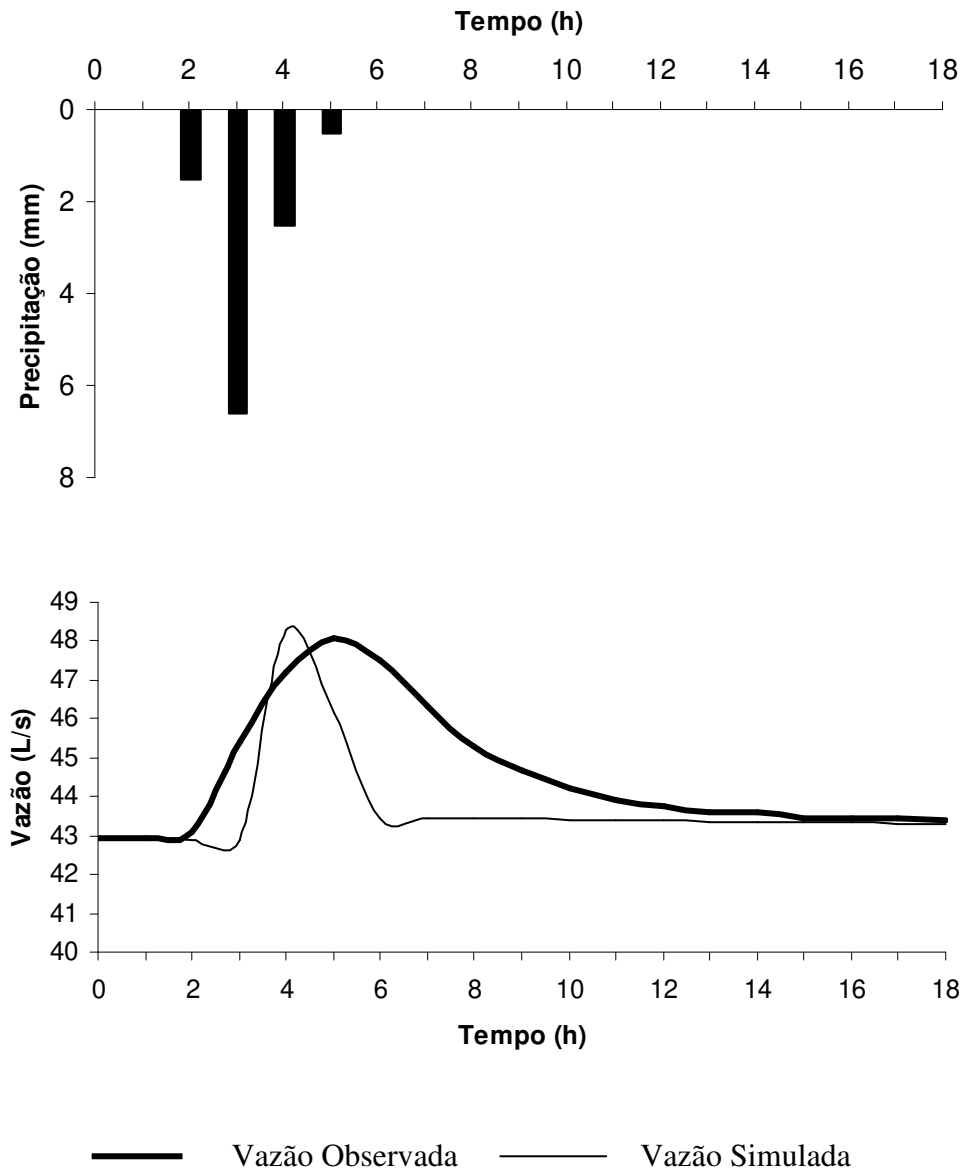
**Figura 173** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 7 (17/1/2000 a 18/1/2000) utilizado no processo de validação do modelo TOPMODEL aplicado em conjunto a um modelo de interceptação vegetal, considerando a hipótese H2 de distribuição da precipitação interceptada.



**Figura 174** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 8 (25/1/2000 a 26/1/2000) utilizado no processo de validação do modelo TOPMODEL aplicado em conjunto a um modelo de interceptação vegetal, considerando a hipótese H2 de distribuição da precipitação interceptada.



**Figura 175** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 9 (26/1/2000 a 27/1/2000) utilizado no processo de validação do modelo TOPMODEL aplicado em conjunto a um modelo de interceptação vegetal, considerando a hipótese H2 de distribuição da precipitação interceptada.



**Figura 176** – Ietograma observado, Hidrogramas observado e simulado, correspondentes ao evento 10 (25/6/2000 a 26/6/2000) utilizado no processo de validação do modelo TOPMODEL aplicado em conjunto a um modelo de interceptação vegetal, considerando a hipótese 2 de distribuição da precipitação interceptada.