

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PRODUÇÃO VEGETAL**

**MAYCON PATRICIO DE HOLLANDA**

**AVALIAÇÃO DO TOPMODEL EM MICROBACIA  
HIDROGRÁFICA NO MUNICÍPIO DE ALEGRE, ES**

ALEGRE, ES

2012

MAYCON PATRÍCIO DE HOLLANDA

**AVALIAÇÃO DO TOPMODEL EM MICROBACIA  
HIDROGRÁFICA NO MUNICÍPIO DE ALEGRE, ES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Produção Vegetal, na área de concentração Planejamento e Manejo de Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. Dr. Roberto Avelino Cecílio.

Co-orientador: Prof. Dr. Sidney Sára Zanetti

ALEGRE, ES

2012

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)  
(Biblioteca Setorial de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

---

H737a Hollanda, Maycon Patricio de, 1984-  
Avaliação do topmodel em microbacia hidrográfica no município de Alegre, ES / Maycon Patricio de Hollanda. – 2012.  
96 f. : il.

Orientador: Roberto Avelino Cecílio.

Coorientador: Sidney Sára Zanetti.

Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias.

1. Hidrologia. 2. Bacias hidrográficas – Alegre (ES). 3. Ciclo hidrológico. 4. Escoamento. I. Cecílio, Roberto Avelino. II. Zanetti, Sidney Sára. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de Ciências Agrárias. IV. Título.

CDU: 63

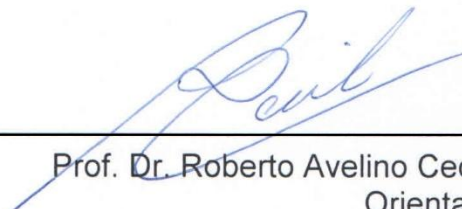
---

# AVALIAÇÃO DO TOPMODEL EM MICROBACIA HIDROGRÁFICA NO MUNICÍPIO DE ALEGRE, ES

**Maycon Patricio de Hollanda**


Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Produção Vegetal.

Aprovada em 19 de Dezembro de 2012.




---

Prof. Dr. Roberto Avelino Cecílio  
Orientador




---

Prof. Dr. Sidney Sára Zanetti  
Co-orientador



---

Prof. Dr. Giovanni de Oliveira Garcia  
Examinador Interno



---

Profª. Drª. Larice Nogueira de Andrade  
Examinador Externo

Dedico este estudo: aos meus pais  
Ezequiel e Maria da Penha;  
a minha irmã Fabyola;  
ao meu cunhado Anderson;  
aos meus sobrinhos Gibson e Gabriel;  
a minha namorada Juliana.

## AGRADECIMENTOS

A jornada foi árdua, tensa e por vezes propicia a desistência. Conciliar atividades de pesquisas, família e mudança de cidade, com o curso de mestrado foi exaustivo. Mas, o resultado gerou este fruto; não de uma conquista pessoal, mas de todos que me ajudaram a chegar até o fim.

Por isso, deixo os meus sinceros agradecimentos:

Em primeiro lugar ao todo poderoso Deus, pois sem ele nada disso seria possível.

Aos meus queridos pais Ezequiel Aprígio de Hollanda e Maria da Penha Patricia de Hollanda, pessoas maravilhosas que sacrificaram oportunidades em suas vidas em função dos filhos. Ainda que eu vivesse duas vidas, seria impossível pagar tamanho débito para com eles.

A minha querida e amada irmã Fabyola e ao meu cunhado Anderson, que por diversas vezes “seguraram a barra” enquanto eu estava distante de casa, pelo apoio emocional, financeiro e compreensão em todos os momentos.

A todos os meus familiares, pelo apoio, incentivo, ajuda e carinho.

Agradecimento especial à minha outra família: Maria José (Dona Zézé), Francisco Gomes (Sr. Chiquinho) e Juliana Silva Gomes, por compartilharem teto, alimentação, alegrias, tristezas e experiências, sem vocês a caminhada seria muito difícil.

Ao Prof. Dr. Roberto Avelino Cecílio, pela orientação, incentivo e confiança. Deixo claro que sua participação no meu processo de formação foi muito importante desde o início da graduação até os dias de hoje e sei que sua ajuda foi fundamental no meu crescimento profissional e pessoal.

Ao Prof. Dr. Sidney Sára Zanetti, pelos conselhos, ajudas e esclarecimentos.

Aos amigos das antigas Repúblicas: Lima Deleon, Gustavo Martins, Eduardo Vargas, Daniel Cometti e ao mais novo amigo Carlos Henrique (Boy), a todos obrigado pelos conselhos, alegrias e amparos nos momentos difíceis.

A Jovana Sater, pela grande amizade depositada em mim durante todos esses anos.

Aos amigos Hugo Roldi e Leonardo Nazário, pelo apoio no início da caminhada.

Aos meus grandes amigos Igor Brinati, Danilo Fukunaga e João Vitor Toledo, pela capacidade de trabalharem em equipe, e pela amizade sincera que torna sempre agradável a realização de um trabalho.

Em especial ao meu amigo Wesley Augusto Campanharo, pela permanente ajuda, sempre com muita disposição, em todas as etapas do desenvolvimento deste trabalho. Definitivamente um amigo ímpar.

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal e a Universidade Federal do Espírito Santo, pela formação e oportunidade concedida.

A CAPES pela concessão da bolsa de estudos Este agradecimento colocado assim de maneira tão “seca”, não reflete a importância da bolsa no momento de se fazer um curso de pós-graduação. Quero deixar claro que é MUITO obrigado pela bolsa!

A Newton Barboza Campos, por sempre ter cedido a área do Sítio Jaqueira para a realização de pesquisas, principalmente desta.

Aos amigos do “pedal”, por todos os momentos de alegria e descontração, isso foi essencial para aliviar o estresse.

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

## **BIOGRAFIA**

MAYCON PATRICIO DE HOLLANDA, filho de Maria da Penha Patricia de Hollanda e Ezequiel Aprício de Hollanda, nasceu em Vitória – ES, em 18 de agosto de 1984.

Em dezembro de 2003, concluiu o segundo grau (Técnico em Agropecuária) na Escola Agrotécnica Federal de Alegre, Alegre – ES.

Em março de 2005, ingressou na Universidade Federal do Espírito Santo (UFES), graduando-se em agronomia em agosto de 2010.

Em agosto de 2010, ingressou no Programa de Mestrado em Produção Vegetal do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre – ES, concentrando seus estudos na Área de Planejamento e Manejo de Recursos Hídricos, submetendo-se a defesa de dissertação em dezembro de 2012.

*"O sofrimento é passageiro, desistir é para sempre."*

Lance Armstrong

*Ad augusta per angusta.*

## RESUMO

HOLLANDA, Maycon Patricio de. M.Sc., Universidade Federal do Espírito Santo, dezembro de 2012. **Avaliação do topmodel em microbacia hidrográfica no município de Alegre, ES.** Orientador: DSc. Roberto Avelino Cecílio. Coorientador: DSc. Sidney Sára Zanetti.

A utilização não sustentável dos recursos naturais tem gerado condições de escassez ou até mesmo esgotamento de alguns destes recursos. A água é um dos recursos naturais mais ameaçados pela exploração não sustentável. O estudo em bacias hidrográficas possibilita a integração dos fatores que condicionam a qualidade e a quantidade dos recursos hídricos, com os seus reais condicionantes físicos e antrópicos. A modelagem matemática constitui uma importante ferramenta para o gerenciamento dos recursos hídricos e o estudo geográfico de bacias hidrográficas. Do exposto, objetivou-se, avaliar a aplicabilidade do TOPMODEL para simular a vazão máxima ( $Q_{m\acute{a}x}$ ), lâmina de escoamento superficial (LES) e hidrogramas de escoamento superficial em eventos de precipitação na microbacia hidrográfica do córrego Jaqueira (MCJ). A área de estudo possui 0,22 km<sup>2</sup>, cinco tipos de uso e cobertura do solo, e um rio perene. Os dados de entrada do modelo constituíram-se do Índice topográfico, gerado a partir do MNT com resolução de 7m X 7m, da capacidade de água disponível na zona radicular, obtida por meio da média ponderada de cada valor para cada cobertura do solo, do déficit inicial de umidade na zona radicular, sendo considerado como 40% do  $SR_{m\acute{a}x}$ , da velocidade de propagação em canal, calculado a partir do tempo de concentração, e do armazenamento exponencial e da transmissividade efetiva do solo, ambos obtidos em literatura. Foram escolhidos 20 eventos durante o período de 19 de julho de 2009 a 28 de dezembro de 2011, no qual foram escolhidos de forma aleatória 6 eventos para calibração e 14 eventos para validação do modelo. Os eventos simulados no processo de calibração mostrou tendência de subestimar a  $Q_{m\acute{a}x}$  e LES em média 71% e 51%, respectivamente, ao final do processo foi calculado a média dos parâmetros de entrada tendo como critério os valores dos eventos que apresentaram valores positivos de eficiência, para serem utilizados no processo de validação. Após simular os 14 eventos destinados ao processo de validação do modelo, observou-se a tendência do modelo em simular 4 tipos de hidrogramas, que são, eventos em que os valores de  $Q_{m\acute{a}x}$  e LES foram subestimados em média de

50%, eventos que apresentam simulações com dois picos de  $Q_{m\acute{a}x}$ , em que o primeiro pico é subestimado e o segundo superestimado, eventos que apresentaram os melhores valores de eficiência com um pico bem definido, e eventos que apresentaram os piores valores de eficiência. Sendo que em resumo o modelo subestimou a  $Q_{m\acute{a}x}$  em 71% dos eventos e a LES em 51% dos eventos. Cabe destacar os eventos 6, 10 e 14 onde apresentaram eficiência acima de 0,70, e os eventos 9 e 11, em que por não terem suas amplitudes de intensidade de precipitação englobadas no processo de calibração apresentaram os piores resultados entre todos os eventos de validação analisados. Apesar do TOPMODEL apresentar baixa eficiência em diversas simulações dos hidrogramas de vazão de escoamento superficial, o modelo é promissor na modelagem dos hidrogramas, uma vez que os valores de vazão analisados na MCJ são muito pequenos.

**Palavras-chave:** modelo hidrológico, simulação de hidrograma, vazão máxima de escoamento superficial, lâmina de escoamento superficial, bacia hidrográfica.

## ABSTRACT

HOLLANDA, Maycon Patricio de. M.Sc., Federal University of Espírito Santo, december 2012. **EVALUATION OF TOPMODEL IN MICROBASIN HIDROGRAPHIC IN THE CITY OF ALEGRE, ES.** Adviser: DSc. Roberto Avelino Cecílio. Co-adviser: DSc. Sidney Sára Zanetti.

The unsustainable use of natural resources has generated conditions of scarcity or even exhaustion of some of these resources. Water is a natural resource most threatened by unsustainable exploration. The study watersheds enables integration of the factors that influence the quality and quantity of water resources, with its real physical and human constraints. Mathematical modeling is an important tool for the management of water resources and geographical study watershed. From the above, our aim was to evaluate the applicability of TOPMODEL to simulate the maximum flow ( $Q_{m\acute{a}x}$ ), blade runoff (LES) and the runoff hydrographs for rainfall events in the microbasin hydrographic Jaqueira (MCJ). The study area has 0.22 km<sup>2</sup>, five types of land use and land cover, and a perennial river. The input data of the model consisted of topographic index, generated from the DEM with resolution of 7m x 7m, the available water capacity in the root zone, obtained by weighted average of each value for each ground cover, the initial deficit of moisture in the root zone, considered as 40% of  $SR_{m\acute{a}x}$ , propagation velocity in the channel, calculated from the time of concentration and storage exponential transmissivity and effective soil, both obtained in literature. 20 events were chosen during the July 19th, 2009 to December 28th, 2011, which were randomly selected for calibration 6 events and 14 events for model validation. The simulated events in the calibration process tended to underestimate the  $Q_{m\acute{a}x}$  and LES averaged 71% and 51%, respectively, at the end of the process was calculated average of the input parameters and values as a criterion of events that showed positive values efficiency to be used in the validation process. After the 14 events designed to simulate the process of validating the model, we observed a tendency of the model to simulate four types of hydrographs, which are events in which the values of  $Q_{m\acute{a}x}$  and LES were underestimated on average by 50%, events that showing simulations with two peaks  $Q_{m\acute{a}x}$ , where the first was underestimated and the second peak was overestimated, events that showed the best efficiency with a well defined peak, and events that showed the worst performance. In summary the model underestimated the  $Q_{m\acute{a}x}$  in 71% of events and the LES in 51% of events. It is

worth mentioning events 6, 10 and 14 when it showed an accuracy of 0.70, and events 9 and 11, as for not their amplitudes of rainfall intensity encompassed by the calibration procedure gave the poorest results among all events Validation analyzed. Despite the low efficiency in TOPMODEL present several simulations of flow hydrographs of runoff, the model is promising in modeling of hydrographs, once that the values of flow analyzed in MCJ are very small.

**Keywords:** hydrological model, simulation hydrograph, peak flow of runoff, blade runoff basin, watershed.

# SUMÁRIO

<b>RESUMO.....</b>	<b>vii</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>ix</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>xii</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>xiv</b>
<b>LISTA DE EQUAÇÕES.....</b>	<b>xvi</b>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>17</b>
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>20</b>
<b>2.1 Modelagem hidrológica.....</b>	<b>20</b>
2.1.1 Classificação dos modelos hidrológicos.....	22
2.1.2 Aplicação dos modelos hidrológicos.....	24
<b>2.2 Modelo hidrológico TOPMODEL.....</b>	<b>25</b>
2.2.1 Conceito.....	25
2.2.2 Teoria.....	29
2.2.3 Aplicação do modelo TOPMODEL em bacias brasileiras.....	34
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>40</b>
<b>3.1 Área de estudo.....</b>	<b>40</b>
3.1.1 Localização e caracterização.....	40
3.1.2 Imagens temáticas.....	42
3.1.3 Diagnóstico físico da área.....	44
3.1.4 Monitoramento da precipitação e vazão.....	46
<b>3.2 Aplicação do modelo TOPMODEL.....</b>	<b>49</b>
3.2.1 Dados de entrada.....	49
3.2.2 Escolha dos eventos utilizados nas simulações.....	52
3.2.3 Calibração e validação.....	53
<b>3.3 Índices de avaliação.....</b>	<b>54</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>55</b>
<b>4.1 Dados de entrada.....</b>	<b>55</b>
4.1.1 Índice topográfico.....	55

4.1.2	Parâmetros de entrada .....	57
<b>4.2</b>	<b>Calibração.....</b>	<b>58</b>
<b>4.3</b>	<b>Validação .....</b>	<b>63</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>72</b>
<b>6</b>	<b>RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>74</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>75</b>
	<b>APÊNDICE.....</b>	<b>85</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fluxograma dos procedimentos necessários para a execução do modelo TOPMODEL. ....	26
Figura 2 – Diagrama esquemático do conceito de TOPMODEL .....	27
Figura 3 – Balanço hídrico de um segmento de encosta da bacia hidrográfica .....	29
Figura 4 – Vista aérea da microbacia hidrográfica do córrego Jaqueira, Alegre-ES .	40
Figura 5 – Modelo Numérico do Terreno, resolução 7m x 7m. ....	42
Figura 6 – Uso e ocupação do solo da área de estudo. ....	43
Figura 7 – Perfil longitudinal do curso d'água principal da microbacia .....	46
Figura 8 – Estação meteorologia automática (A) e vertedor construído no exutório da microbacia hidrográfica, com detalhe do sensor de pressão (B). ....	47
Figura 9 – Curva de calibração do vertedor para o linígrafo de pressão .....	48
Figura 10 – Método de separação entre escoamento subterrâneo e superficial. ....	48
Figura 11 – Padrão espacial do índice topográfico na microbacia estudada. ....	55
Figura 12 – Distribuição do índice topográfico na microbacia estudada .....	56
Figura 13 – Variação da vazão máxima observada e simulada para os eventos de calibração. ....	61
Figura 14 – Variação da lâmina de escoamento superficial (LES) observada e simulada para os eventos de calibração. ....	62
Figura 15 – Ajuste entre as vazões máximas ( $Q_{m\acute{a}x}$ ) e lâminas de escoamento superficial (LES) observadas e simuladas pelo TOPMODEL, para os 14 eventos de precipitação simulados no processo de validação .....	66
Figura 16 – Vazão observada e simulada no processo de validação, correspondente ao Evento 07 no dia 12/03/2010. ....	68
Figura 17 – Vazão observada e simulada no processo de validação, correspondente ao Evento 15 no dia 28/02/2011. ....	69
Figura 18 – Vazão observada e simulada no processo de validação, correspondente ao Evento 20 no dia 28/12/2011. ....	70

Figura 19 – Vazão observada e simulada no processo de validação, correspondente ao Evento 14 no dia 23/02/2011.....	71
Figura 20A – Vazão observada e simulada no processo de validação, correspondente ao Evento 01 no dia 19/07/2009.....	86
Figura 21A – Vazão observada e simulada no processo de validação, correspondente ao Evento 03 no dia 14/12/2009.....	86
Figura 22A – Vazão observada e simulada no processo de validação, correspondente ao Evento 05 no dia 11/03/2010.....	87
Figura 23A – Vazão observada e simulada no processo de validação, correspondente ao Evento 06 no dia 12/03/2010.....	87
Figura 24A – Vazão observada e simulada no processo de validação, correspondente ao Evento 07 no dia 12/03/2010.....	88
Figura 25A – Vazão observada e simulada no processo de validação, correspondente ao Evento 09 no dia 07/11/2010.....	88
Figura 26A – Vazão observada e simulada no processo de validação, correspondente ao Evento 10 no dia 23/11/2010.....	89
Figura 27A – Vazão observada e simulada no processo de validação, correspondente ao Evento 11 no dia 03/12/2010.....	89
Figura 28A – Vazão observada e simulada no processo de validação, correspondente ao Evento 14 no dia 23/02/2011.....	90
Figura 29A – Vazão observada e simulada no processo de validação, correspondente ao Evento 15 no dia 28/02/2011.....	90
Figura 30A – Vazão observada e simulada no processo de validação, correspondente ao Evento 17 no dia 17/10/2011.....	91
Figura 31A – Vazão observada e simulada no processo de validação, correspondente ao Evento 18 no dia 15/11/2011.....	91
Figura 32A – Vazão observada e simulada no processo de validação, correspondente ao Evento 19 no dia 28/12/2011.....	92
Figura 33A – Vazão observada e simulada no processo de validação, correspondente ao Evento 20 no dia 28/12/2011.....	92

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Fração granulométrica do solo e classe textural para as diferentes coberturas do solo na microbacia em estudo.....	44
Tabela 2 – Valores de densidade do solo ( $D_s$ ), densidade de partículas ( $D_p$ ), microporosidade (Micro), macroporosidade (Macro) e porosidade total (PT), para as diferentes coberturas do solo encontradas na microbacia .....	45
Tabela 3 – Valores de umidade correspondente à capacidade de campo ( $\theta_{cc}$ ), ponto de murcha permanente ( $\theta_{PMP}$ ) e taxa de infiltração estável ( $T_{ie}$ ), nas diferentes coberturas do solo encontradas na microbacia .....	45
Tabela 4 - Parâmetros de entrada do modelo TOPMODEL.....	50
Tabela 5 – Intervalos dos parâmetros $m$ e $\ln(T_0)$ utilizados nas simulações pelo método de Monte Carlo.....	50
Tabela 6 - Eventos escolhidos para aplicação do modelo TOPMODEL: Precipitação total ( $P_T$ ), intensidade de precipitação máxima ( $I_{p_{m\acute{a}x.}}$ ), intensidade de precipitação média ( $I_{p_{m\acute{e}d.}}$ ), lâmina de escoamento superficial ( $LES_{obs}$ ) e vazão máxima de escoamento superficial observada ( $Q_{m\acute{a}x.obs}$ ).....	52
Tabela 7 - Valores do parâmetros: $m$ - parâmetro de armazenamento exponencial (m); $\ln(T_0)$ - logaritmo natural da transmissividade efetiva do solo saturado ( $m^2/h$ ); $SR_{m\acute{a}x}$ - capacidade de água disponível na zona radicular (m); $SR_{init}$ - déficit inicial de umidade na zona radicular (m); $ChVel$ - velocidade de propagação em canal (m/h). do modelo TOPMODEL e do coeficiente de eficiência ( $E$ ) dos eventos de calibração.....	58
Tabela 8 - Eventos de calibração – precipitação total ( $P_T$ ), vazão máxima simulada ( $Q_{m\acute{a}x.sim}$ ) e lâmina de escoamento superficial simulada ( $LES_{sim}$ ).....	60
Tabela 9 - Valores dos parâmetros do modelo TOPMODEL obtidos ao final do processo de calibração. ....	63
Tabela 10 – Resultados da validação do modelo TOPMODEL: vazão máxima de escoamento superficial simulada ( $Q_{m\acute{a}x.sim}$ ) e lâmina de escoamento superficial ( $LES_{sim}$ ) .....	63

Tabela 11 - Indicadores de avaliação entre dados simulados e observados de vazão máxima ( $Q_{\text{máx}}$ ) e lâmina de escoamento superficial (LES), pelo modelo TOPMODEL, para os 14 eventos de precipitação no processo de validação. ....	65
Tabela 12 - Indicadores de avaliação entre dados, simulados pelo TOPMODEL, de vazão de escoamento superficial (L/s), para cada um dos 14 eventos de precipitação no processo de validação.....	67

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1 – Índice topográfico .....	30
Equação 2 – Transmissividade do solo.....	30
Equação 3 – Parâmetro da curva de transmissividade .....	31
Equação 4 – Fluxo subsuperficial por unidade de comprimento do contorno .....	31
Equação 5 – Fluxo subsuperficial quando a taxa de recarga é constante no espaço.....	31
Equação 6 – Profundidade da superfície de saturação.....	32
Equação 7 – Profundidade média da superfície saturada da bacia .....	32
Equação 8 – Diferença entre o valor médio na bacia e os valores locais da profundidade da superfície de saturação .....	32
Equação 9 – Diferença entre o valor médio na bacia e os valores locais da profundidade da superfície de saturação considerando a recarga espacialmente uniforme .....	32
Equação 10 – Déficit de armazenamento da zona saturada.....	32
Equação 11 – Porosidade total .....	44
Equação 12 – Equação de Thompson .....	47
Equação 13 – Capacidade máxima de água disponível na zona radicular ( $SR_{máx}$ ) ..	50
Equação 14 – Velocidade de propagação em canal (ChVel) .....	51
Equação 15 – Tempo de concentração (Kirpich) .....	51
Equação 16 – Coeficiente de eficiência (E).....	54
Equação 17 – Erro absoluto médio (EAM) .....	54
Equação 18 – Raiz do quadrado médio do erro (RQME).....	54

## 1 INTRODUÇÃO

A disponibilidade de água em qualidade e quantidade adequadas pode ser citada como fator limitante ao desenvolvimento da sociedade contemporânea em sua totalidade.

Embora seja um recurso natural renovável, a água tem suas distribuições espaciais e temporais muito heterogêneas, tornando-se um bem de cada vez mais difícil acesso. A deterioração da qualidade das águas provoca diversos prejuízos, como alteração do equilíbrio ecológico, perda da diversidade biológica, desequilíbrio climático e alterações profundas no ciclo da água, que afetam diretamente a sociedade, uma vez que os bens e serviços ambientais são reduzidos ou esgotados.

Atualmente, a preocupação com a conservação e manutenção de padrões de qualidade mínimos nos recursos hídricos ultrapassa as esferas de cada ciência, fazendo com que o tema seja tratado a partir de uma ótica multidisciplinar.

No Estado do Espírito Santo, em anos de baixa precipitação pluviométrica, já se verificaram algumas tendências à desertificação em determinadas regiões, principalmente em solos que, por sua baixa capacidade de retenção de água e pelo comportamento hidrológico, assemelham-se àqueles dos ambientes desérticos. Assim, programas que visem o desenvolvimento e difusão de tecnologia objetivando a proteção e a recuperação das nascentes e as áreas de contribuição hídrica são de extrema validade.

Para que seja preservado e garantido o acesso às reservas e aos corpos hídricos, é fundamental que se tenha um profundo conhecimento das necessidades de seus usuários e da capacidade de oferta e renovação das fontes naturais. Desta forma, serão fornecidos subsídios para a definição de princípios regulatórios e da capacidade de suporte de cada bacia hidrográfica (CASTILHO, 2005).

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. Contudo, a determinação das disponibilidades de recursos hídricos apresenta grande complexidade em função das interações existentes entre os diferentes processos do ciclo hidrológico. A

compreensão dos mecanismos hidrológicos possibilita condições suficientes para avaliação da dinâmica dos recursos hídricos (CASTILHO, 2005).

A modelagem matemática constitui uma importante ferramenta para o gerenciamento dos recursos hídricos e o estudo hidrológico de bacias hidrográficas. A modelagem contribui para o entendimento dos fenômenos hidrológicos, previsão de vazões e simulação de cenários (SILVA; KOBAYAMA, 2007).

De acordo com Beven (2001), os modelos são um meio para extrapolar os dados medidos no tempo e no espaço, particularmente para bacias sem medição ou pouco monitoradas, e dar suporte à tomada de decisão sobre problemas hidrológicos em planejamento de recursos hídricos, proteção a inundações, mitigação de contaminações, entre outras atividades. Por essa razão, faz-se necessário o contínuo desenvolvimento de novos algoritmos, a adaptação de novos conceitos a modelos existentes e a re-avaliação e inter-comparação dos sistemas existentes, aplicados a diferentes localidades.

Diversos modelos hidrológicos foram e estão sendo desenvolvidos pela comunidade científica, dentre os quais se destaca o *TOPMODEL*. O modelo *TOPMODEL* (*Topography Based Hydrological Model*) foi desenvolvido por Beven; Kirkby (1979) na Lancaster University, Inglaterra. A versão TOPMODEL para Windows - 97.01 é a mais recente e pode ser adquirida gratuitamente no site <[http://www.es.lancs.ac.uk/hfdg/freeware/hfdg\\_freeware\\_top.htm](http://www.es.lancs.ac.uk/hfdg/freeware/hfdg_freeware_top.htm)>.

Consiste em um modelo do tipo determinístico, semidistribuído e baseado em processos físicos. Esse modelo pressupõe que a dinâmica da água resulta das características do solo e do relevo de toda a bacia contribuinte, o que fornece como resultado, além da vazão do rio, a distribuição espacial da umidade no sistema durante o tempo, permitindo estimar, por meio de calibragem, valores característicos de algumas propriedades físico-hídricas do solo, como a transmissividade (SANTOS; KOBAYAMA, 2008).

Os principais atrativos na aplicação do modelo TOPMODEL estão relacionados ao pequeno número de parâmetros do modelo associado a uma razoável conceituação física. Desde sua elaboração, o modelo TOPMODEL foi aplicado em bacias hidrográficas localizadas em várias regiões no mundo como: Itália (FRANCHINI et al., 1996); Austrália (SIVAPALAN; WOODS; KALMA, 1997); Espanha (CEBALLOS;

SCHNABEL, 1998); Inglaterra (BEVEN; FREER, 2001); Guiné (CAMPLING et al., 2002); Zimbabwe (GUMINDOGA; RWASOKA; MURWIRA, 2011) e também em vários estados brasileiros, apresentando resultados satisfatórios quanto a sua eficiência: Distrito Federal (VARELLA; CAMPANA, 2000); Paraná (MINE; CLARKE, 1996; ZAKIA, 1998; SANTOS; KOBAYAMA, 2008; SIEFERT; SANTOS, 2010); Pernambuco (ARAÚJO et al, 2005); Rio de Janeiro (XAVIER, 2002); e São Paulo (SCHULER et al, 2000; MORAES et al, 2003; RENNÓ; SOARES, 2003; FERREIRA, 2004; RANZINI et al, 2004). Apesar de inúmeros trabalhos desenvolvidos no Brasil, existe carência na avaliação do TOPMODEL no estado do Espírito Santo, não sendo encontrados trabalhos até o presente momento.

Levando-se em conta a necessidade de entender os processos de escoamento superficial na bacia estudada, e o potencial de utilização do modelo hidrológico Topography Based Hydrological Model (TOPMODEL), objetivou-se com este trabalho avaliar a aplicabilidade do modelo em simular o comportamento das vazões de escoamento superficial de eventos na microbacia hidrográfica do Córrego Jaqueira (MCJ), localizada no município de Alegre-ES.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Modelagem hidrológica

Segundo Tucci (2005), os modelos hidrológicos são ferramentas utilizadas para representar os processos que ocorrem na bacia hidrográfica e prever as consequências das diferentes ocorrências em relação aos valores observados.

A modelagem hidrológica requer conhecimento aprofundado sobre o ciclo hidrológico. O ciclo hidrológico é o conjunto de fases e processos característicos da circulação da água no meio ambiente. As fases do ciclo hidrológico (precipitação, interceptação pela cobertura vegetal, evaporação, transpiração das plantas, infiltração, redistribuição e armazenamento da água no solo, escoamentos superficial, subsuperficial e subterrâneo) dependem de um grande número de variáveis e, muitas delas, estão inter-relacionadas, dificultando o estudo das diferentes etapas do ciclo em bacias hidrográficas (LIMA, 2010). De acordo com Santos (2009), é possível representar todas essas fases através de modelos matemáticos.

A modelagem hidrológica permite verificar a consistência dos dados disponíveis, obtidos a partir das observações hidrológicas nas bacias hidrográficas, e com base nesses dados, os modelos hidrológicos podem ser calibrados, permitindo, por exemplo, a geração de séries sintéticas e a utilização dos modelos como ferramenta de obtenção de dados em bacias não monitoradas (SANTOS, 2009).

O desenvolvimento dos primeiros modelos hidrológicos, que buscaram identificar os fatores relacionados aos processos de transformação da precipitação em escoamento e suas interações, são datados da década de 1930, sendo eles: a teoria do hidrograma unitário (SHERMAN, 1932) e a teoria da infiltração de Horton (1933). Segundo Tucci (2005), até a década de 50, os métodos utilizados em hidrologia se limitavam, quase sempre, a indicadores estatísticos dos processos, com uma tendência geral de desenvolvimento dos modelos ditos empíricos, os quais representam os processos hidrológicos sem levar em conta os fenômenos físicos envolvidos.

Com a evolução da informática e das técnicas de análises numéricas e estatísticas, nas décadas de 60 e 70, houve um desenvolvimento acelerado de modelos hidrológicos ditos semiconceituais. Os mais conhecidos desses primeiros modelos são o *Streamflow Synthesis and Reservoir Regulation Model* - SSARR (ROCKWOOD, 1958) e o *Stanford Watershed Model* – SWM (CRAWFORD; LINSLEY, 1966), que representam os principais processos do ciclo hidrológico utilizando funções empíricas e a equação da continuidade (LIMA, 2010).

Na década de 70, observou-se um grande esforço no estudo de procedimentos de calibração dos modelos hidrológicos (IBBITT; O'DONNELL, 1971; CLARKE, 1973; JOHNSTON; PILGRIM, 1976), onde também foram apresentadas as primeiras tentativas de se utilizar uma parametrização mais fiel dos modelos e a representação dos diversos processos físicos de interesse por meio de equações diferenciais (STEPHENSON; FREEZE, 1974; GUPTA; SOLOMON, 1977). No final dessa década, surgiu o modelo *TOPMODEL* (BEVEN; KIRKBY, 1979), voltado para a simulação de diferentes processos de fluxo da água em bacias hidrográficas.

A utilização do modelo *TOPMODEL* tornou-se ampla na década de 90, por ser considerado uma evolução da modelagem hidrológica ao representar, mesmo que de forma simplificada, os principais processos físicos do ciclo hidrológico (BEVEN et al., 1995). Com base nos erros e acertos obtidos em suas várias aplicações, Beven (1997) apresentou críticas com relação às limitações do *TOPMODEL*, tais como: as simplificações efetuadas; a derivação da distribuição do índice topográfico a partir do modelo digital de elevação do terreno; o significado e a calibração dos parâmetros do modelo; e outros temas relacionados às incertezas em sua verificação e capacidade preditiva.

Nessa mesma década também surgiram os modelos *KINEROS* (WOOLHISER et al., 1990), *DHSVM* (WIGMOSTA et al., 1994) e *SWAT* (ARNOLD et al., 1994), que representam importantes ferramentas para o estudo do fluxo de água, de substâncias químicas e de sedimentos em bacias hidrográficas.

De forma geral, nas últimas décadas, os modelos hidrológicos se desenvolveram em dois sentidos: *modelos para pequenas bacias*, que buscam representar com maior precisão, e de forma distribuída, os processos hidrológicos; e *modelos para grandes bacias*, que tratam de forma empírica a distribuição dos parâmetros em áreas de grande magnitude (FAYAL, 2008). Segundo Lima (2010), os trabalhos em bacias

menores servem para a geração de conhecimento que, antes de chegar ao tomador de decisão, se necessário, passará ainda por um processo de mudança de escala para que alcance as proporções desejadas. Esses estudos de mudança de escala também marcaram a evolução da área de modelagem na última década (BLÖSCHL, 2001; SIVAPALAN, 2003; SIVAPALAN et al., 2003; BONELL et al., 2006; e SOULSBY et al., 2006).

### **2.1.1 Classificação dos modelos hidrológicos**

Com base nas discussões efetuadas por Clarke (1973), Singh (1995), Refsgaard (1996), Tucci (2005) e Viessman; Lewis (2002), os modelos hidrológicos podem ser classificados sob diferentes aspectos, tais como: a forma de geração (físicos ou matemáticos); a forma de representação dos dados (discretos ou contínuos); o tipo de variáveis utilizadas na modelagem (estocásticos ou determinísticos); o tipo de relações entre essas variáveis (empíricos ou conceituais); a existência ou não de relações espaciais (concentrados ou distribuídos); e a existência de dependência temporal (estacionários ou dinâmicos).

Os modelos de base física são formulados com base em equações que procuram expressar da maneira mais realista possível os processos físicos que ocorrem no sistema simulado, sendo que seus parâmetros são baseados nas características do sistema ou podem ser obtidos por mensuração (COLLISCHONN, 2001), enquanto os modelos matemáticos baseiam-se em equações na busca pela representação dos fenômenos hidrológicos (CHRISTOFOLETTI, 1999).

Apesar dos fenômenos naturais variarem continuamente no tempo, na maioria das vezes, estes fenômenos são representados por modelos discretos. Um sistema é dito discreto quando seu estado muda em intervalos discretos de tempo (DOOGE, 1973). A escolha do intervalo de tempo (passo) no qual o modelo será executado depende basicamente do fenômeno estudado, da disponibilidade de dados e da precisão desejada nos resultados. Em geral, quanto menor o intervalo de tempo, maior será a precisão dos resultados, aumentando também o custo computacional para geração destes resultados (RENNO; SOARES, 2000).

Em um modelo contínuo, as saídas estão definidas para todos os instantes do período que o modelo deve representar, esses modelos são, basicamente, os físicos e os matemáticos com entrada contínua (definida como função matemática contínua) e solução analítica (KRAUSKOPF NETO, 2005).

Os modelos estocásticos utilizam séries históricas de variáveis hidrológicas, como vazões, por exemplo, para, por meio das estatísticas observadas nessas séries, inferirem o comportamento futuro através de séries sintéticas geradas com base nas mesmas hipóteses. São modelos que não se preocupam em explicitar os fenômenos hidrológicos, mas apenas em estabelecer uma relação de causa-efeito. Por outro lado, a modelagem determinística baseia-se no entendimento conceitual dos fenômenos físicos para explicar e tentar reproduzir as condições de geração das variáveis hidrológicas (GONÇALVES, 2008).

O modelo é dito conceitual quando as funções utilizadas consideram os processos físicos envolvidos no sistema. Já os modelos empíricos, são aqueles em que se ajustam os valores calculados aos dados observados por meio de funções sem relação com os processos físicos envolvidos. Os modelos conceituais são comumente diferenciados em semiconceituais ou de base física, sendo que os semiconceituais misturam aspectos conceituais dos processos e equações empíricas que se ajustam ao comportamento observado, enquanto os de base física utilizam as principais equações diferenciais para representar o sistema físico e os seus parâmetros são aqueles mais indicados de acordo com as características conhecidas do sistema (TUCCI, 2005).

Os modelos conceituais permitem a interpretação mais precisa dos processos e dos mecanismos hidrológicos da formação dos escoamentos em bacias. O modelo TOPMODEL é um desses modelos mais conhecidos na literatura, sendo baseado fundamentalmente nas características topográficas da bacia hidrográfica, buscando reproduzir o comportamento hidrológico considerando as variáveis condicionantes de forma distribuída.

Nos modelos concentrados a variabilidade espacial não é considerada. Nestes modelos a superfície geográfica é considerada homogênea e uniforme. A bacia inteira é considerada como uma unidade, onde as variáveis e os parâmetros são tidos como valores únicos para toda área, consistindo em uma simplificação importante da realidade. Nos modelos distribuídos são consideradas a variabilidade

espacial dos componentes e dos valores das variáveis dentro da bacia hidrográfica (FERREIRA, 2004).

Segundo Tucci (2005), um modelo distribuído pode apresentar resultados praticamente iguais aos de um modelo concentrado, no entanto, somente um modelo distribuído permite estudar a variabilidade dos processos ao longo do espaço. As limitações dos modelos distribuídos se referem ao banco de dados, pela sua complexidade e necessidade de uma enorme quantidade de informações. A montagem desses bancos de dados exige um trabalho oneroso, sendo frequentemente comprometidos pelas diferentes escalas de tempo e espaço dos dados já existentes. A utilização de modelos com estrutura semidistribuída é uma forma de minimizar este efeito, pois apresentam informações gerais de algumas variáveis, que não comprometem a simulação dos aspectos desejados.

Os modelos são considerados estacionários se as variações temporais não forem levadas em conta, ou seja, se todos os parâmetros forem temporalmente invariáveis, mesmo que variem espacialmente. Ao contrário de modelos estacionários, os modelos são dinâmicos quando as variáveis sofrem alterações no decorrer do tempo (SILVA, 2005).

Devido ao grande número de alternativas existentes no planejamento dos recursos hídricos, considerando seus usos, disponibilidade e preservação, é necessário utilizar modelos que melhor quantifiquem os processos hidrológicos, permitindo analisar alternativas que auxiliem no processo de decisão.

### **2.1.2 Aplicação dos modelos hidrológicos**

Segundo Nóbrega (2008), a utilização de modelos hidrológicos proporciona custos menores e, além disso, economia de tempo para analisar mudanças físicas e antrópicas na bacia hidrográfica, como por exemplo, a mudança da cobertura do solo e vazão, processos de erosão, que em geral, em uma bacia experimental, levaria muito tempo e pessoal capacitado para analisar os fenômenos hidrológicos. 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 tomar decisões sobre os recursos hídricos em uma bacia, região ou país (MOTA, 1999).

A escolha do modelo hidrológico, a ser utilizado para solução de problemas relacionados à gestão de recursos hídricos, depende de uma avaliação preliminar envolvendo os seguintes aspectos: objetivos do estudo para o qual o modelo será utilizado; características climáticas e físicas da bacia hidrográfica e do rio; disponibilidade de dados; e familiaridade da equipe de projeto com o modelo (TUCCI, 2005).

Segundo Tucci (2005), o processo de aplicação dos modelos pode ser dividido em etapas. A primeira etapa se refere à montagem do banco de dados, onde são levantadas todas as informações necessárias para a simulação. A segunda etapa representa a simulação do modelo, sendo esta etapa dividida em duas fases: calibração e validação. O processo de calibração consiste na identificação de valores dos parâmetros que permitem a melhor simulação de um grupo de dados observados, sendo assim, o modelo é executado para reproduzir condições conhecidas de valores de variáveis de entrada e saída observados.

A incerteza em relação à adequação de um modelo deve ser resolvida pelo teste de validação. A validação é definida como o processo de demonstração dos parâmetros estimados na calibração, onde procura-se observar se os valores dos parâmetros podem ser estendidos a outros grupos de dados, assim, demonstrando a adequação do uso do modelo e tornando legítimo o processo de simulação. Os processos de validação e calibração estão intrinsecamente ligados (FERREIRA, 2004). A última fase é a aplicação, onde o modelo é utilizado para representar situações em que se desconhece a saída do sistema.

## **2.2 Modelo hidrológico TOPMODEL**

### **2.2.1 Conceito**

O modelo TOPMODEL (Topography Based Hydrological Model) foi desenvolvido por Beven; Kirkby (1979) no Centre for Research on Environmental Systems, University

of Lancaster, na Inglaterra. É considerado um modelo determinístico, semi-distribuído e fisicamente baseado, estando fundamentado na idéia de que a topografia exerce um controle dominante sobre o escoamento que se propaga em bacias hidrográficas (BEVEN; KIRKBY, 1979). Desta forma, somente os parâmetros relacionados à topografia são distribuídos, os demais são considerados homogêneos para toda a bacia.

Para a aplicação do modelo, é necessária a organização e o preparo de uma série de informações, como apresentado na Figura 1. A montagem e preparação dos dados, juntamente com o significado dos parâmetros, serão apresentados no item 3.2.

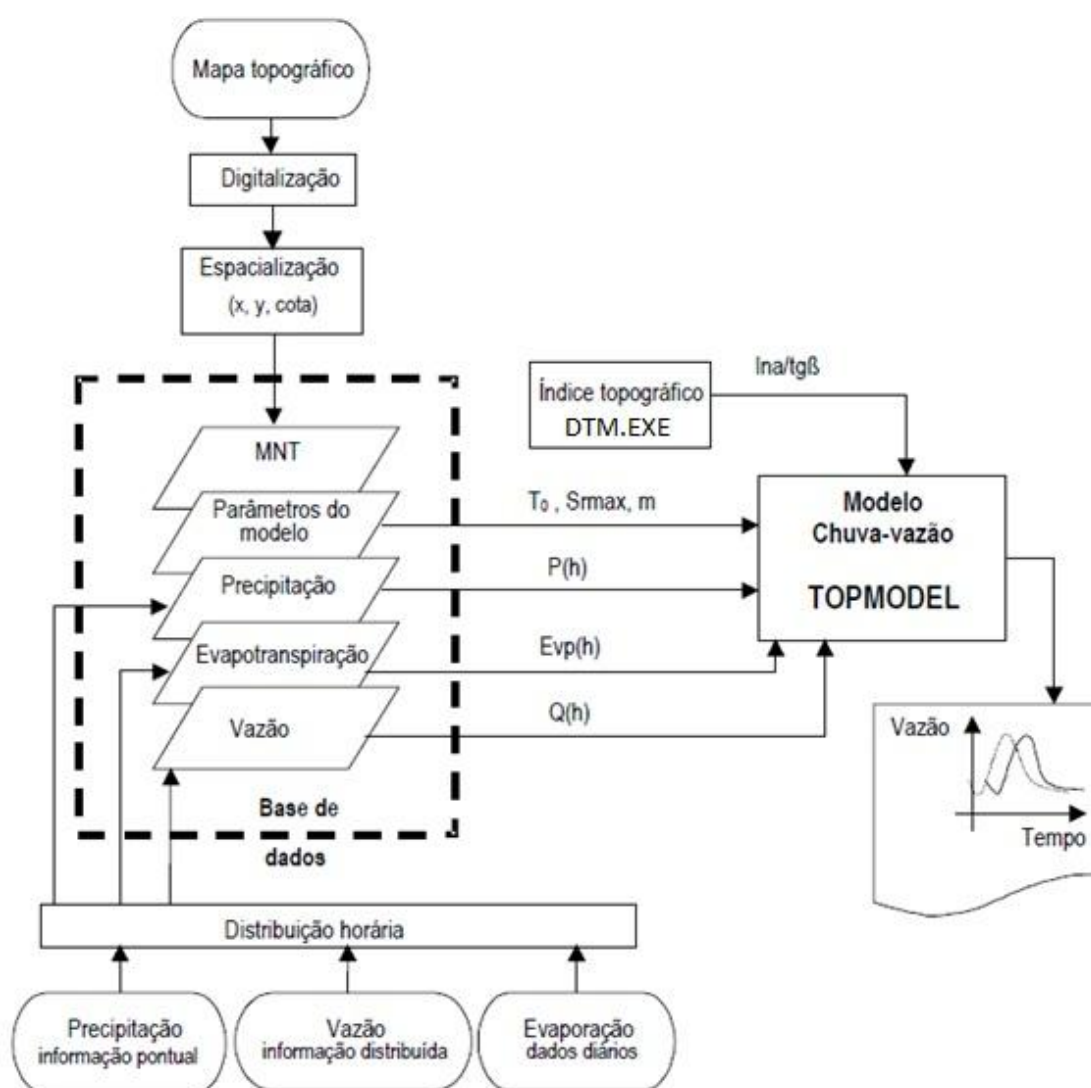


Figura 1 - Fluxograma dos procedimentos necessários para a execução do modelo TOPMODEL.

Fonte: FERREIRA (2004).

O modelo trabalha com o princípio de conservação de massa, ou seja, o fluxo de entrada menos o fluxo de saída é igual à variação de armazenamento, nos diversos reservatórios existentes em uma bacia hidrográfica, por exemplo, um reservatório de interceptação e um reservatório de solo (COELHO, 2003) (Figura 2).

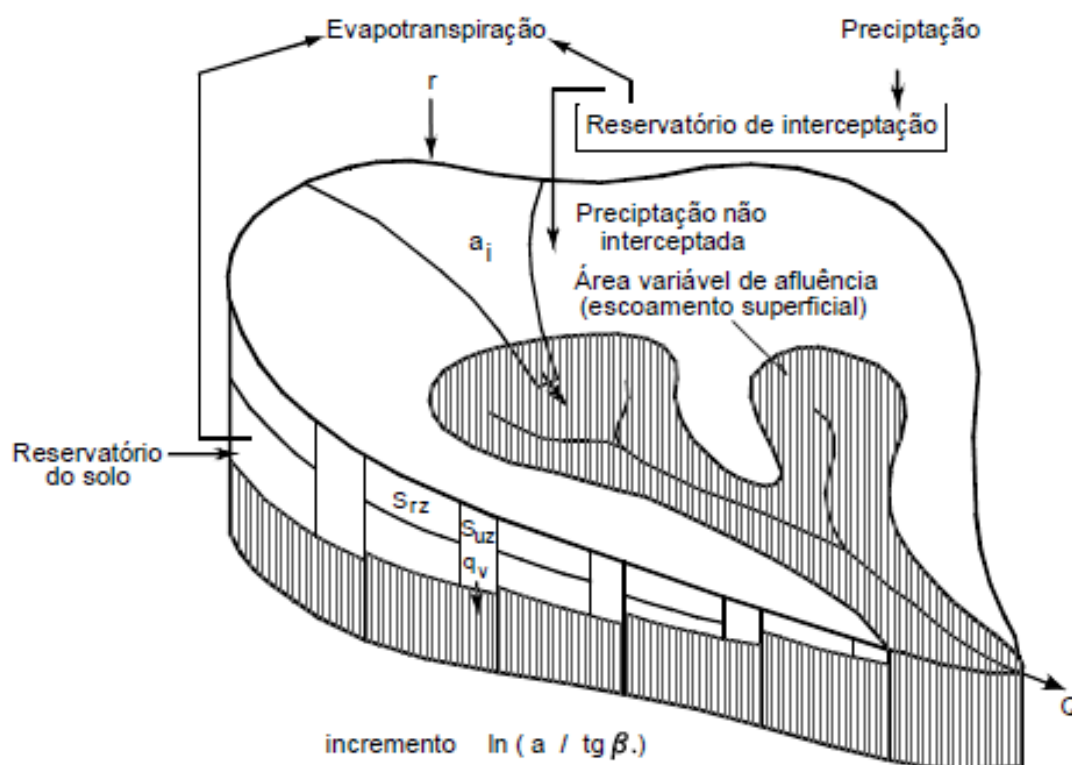


Figura 2 - Diagrama esquemático do conceito de TOPMODEL

Fonte: CASTILHO (2005).

Observando a Figura 2, de acordo com Beven; Kirkby (1979), a chuva abastece o reservatório de interceptação cuja capacidade, da ordem de alguns milímetros, depende do tipo de cobertura vegetal. A saída do reservatório de interceptação é a evaporação, sendo que a precipitação não interceptada que se transforma em entrada para o reservatório do solo. A equação de conservação de massa proporciona um método para calcular o balanço hídrico no reservatório do solo. Unindo as equações de balanço hídrico para todos os reservatórios hipotéticos na bacia, o cálculo do balanço hídrico e da propagação da água pode ser completado.

O TOPMODEL simula o escoamento superficial, o subsuperficial e subterrâneo globalmente através de uma lei exponencial em função do déficit médio de saturação do solo. A dinâmica das superfícies saturadas depende, portanto, da

topografia e da variabilidade espacial da transmissividade, caso se disponha de dados para considerá-la no modelo. O modelo pode ser aplicado como distribuído ou semidistribuído, tendo por base parâmetros físicos da bacia em estudo. Seus parâmetros foram estabelecidos tendo em vista serem interpretados fisicamente, e seu número é mantido com um mínimo para garantir que seus valores não se tornem meramente artefatos estatísticos de um exercício de calibração (COELHO, 2003).

O modelo utiliza o conceito de área variável de contribuição, de acordo com Hewlett; Hibbert (1967), aplicado ao mecanismo de geração do escoamento superficial tipo Dunne (DUNNE; BLACK, 1970), isto é, há geração de escoamento superficial quando o solo está saturado. Desta forma, o escoamento superficial é dependente da quantidade de área saturada na bacia, podendo esta variar a cada intervalo da simulação. Esta característica dinâmica e distribuída da bacia é simulada através de dois principais parâmetros do modelo: (1) o índice topográfico que é função da área de contribuição e da declividade de cada célula; e (2) o déficit de armazenamento que representa a quantidade de água disponível no solo para cada célula (SILVA; KOBAYAMA, 2007).

O TOPMODEL realiza cálculos para computar o balanço hídrico em um conjunto de células definidas topograficamente e utiliza a lei de Darcy para calcular as taxas de fluxo de água através do solo. Considerando um segmento de uma bacia hidrográfica delimitada pelo contorno na base de uma encosta, e lados perpendiculares a este contorno, até o divisor topográfico (Figura 3), tem-se que a precipitação, não interceptada, cai numa taxa  $P$  sobre o segmento de área  $A$  e profundidade  $D$  (distância da superfície até o lençol freático). Uma fração  $R$  infiltra gerando o escoamento subsuperficial ( $q$  subsuperficial). O fluxo de superfície, ou escoamento superficial ( $q$  superficial), decorre das áreas saturadas (escoamento superficial por saturação ou escoamento de retorno). A declividade local ao ponto de saída,  $\beta$ , é considerado igual à declividade da superfície freática (SANTOS, 2009).

Como no TOPMODEL supõe-se que o fluxo é direcionado pela topografia, o segmento apresentado na Figura 3 representa uma parte da rede de fluxo da bacia. O fluxo de água subsuperficial é condicionado fortemente 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. A declividade local, a espessura do solo e a 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, 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 3 (RANZINI, 2002).

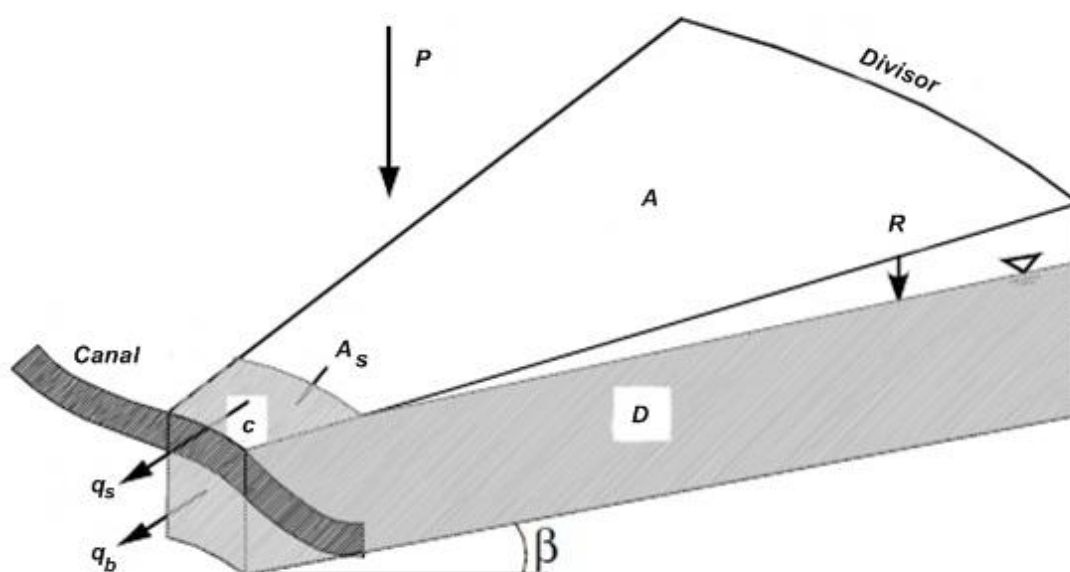


Figura 3 - Balanço hídrico de um segmento de encosta da bacia hidrográfica  
Fonte: CASTILHO (2005).

### 2.2.2 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.

O modelo TOPMODEL foi desenvolvido a partir de quatro hipóteses fundamentais (BEVEN *et al.*, 1995): **(H1)** a dinâmica da zona saturada pode ser obtida por

sucessivas representações de estados uniformes; **(H2)** o gradiente hidráulico da zona saturada é igual a declividade local do terreno ( $tg\beta$ ); **(H3)** a distribuição da transmissividade (definida como o produto da condutividade hidráulica do solo pela espessura do solo saturado) com a profundidade do solo ocorre segundo uma função exponencial; e **(H4)** no intervalo de tempo existe homogeneidade espacial da taxa de recarga que contribui para a área saturada.

As hipóteses (H1) e (H2) conduzem a relações simples entre o armazenamento de água na bacia e os níveis locais do lençol freático, representadas pelo índice topográfico (Equação 1).

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

em que:

$IT$  - índice topográfico;  $a_i$  - área de drenagem específica por unidade de contorno associada ao ponto  $i$  (m);  $tg\beta_i$  - declividade média do terreno, calculada no ponto  $i$ .

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 o mesmo comportamento hidrológico.

O modelo assume que a condutividade hidráulica do solo saturado diminui exponencialmente com a profundidade do solo (H3), situação que pode ser adequada para descrever as mudanças nas propriedades hidráulicas de uma vasta gama de solos (BEVEN, 1984), conforme apresentado na Equação 2:

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

em que:

$T$  - transmissividade do solo em determinado local ( $m^2/h$ );  $T_0$  - transmissividade lateral do solo saturado ( $m^2/h$ ), correspondente à integração da condutividade hidráulica  $K_0$  ( $m/h$ ) no perfil efetivo do solo,  $m$  (m);  $S$  - déficit de armazenamento local (m);  $m$  - altura efetiva do perfil do solo (m);  $z_i$  - profundidade da superfície de saturação, em relação ao nível do terreno no ponto  $i$  (m);  $f$  - parâmetro da curva de transmissividade ( $1/m$ ).

Os parâmetros da curva de transmissividade  $m$  e  $f$  relacionam-se por meio da Equação 3:

$$f = \frac{\Delta\theta_i}{m} \quad (3)$$

em que:

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

Segundo Schuler *et al.* (2000), o parâmetro  $m$  representa a capacidade de saturação do solo, sendo que quanto maior o valor de  $m$ , mais lento será o processo de geração de escoamento superficial e mais suave será a curva de recessão do solo (declínio da descarga natural de uma drenagem na ausência de entrada por precipitação), ou seja, tem-se transmissividade média maior no perfil de solo. Segundo o mesmo autor, o parâmetro  $T_o$  define a transmissividade do perfil do solo quando saturado à superfície; sendo que quanto maior o valor de  $T_o$ , mais altos serão os valores do escoamento lateral, sendo mais rápido o esvaziamento do reservatório de água no solo (zona não-saturada).

A partir da hipótese (H2) de um gradiente hidráulico e de fluxo na região saturada, paralela à superfície do terreno no local, através da lei de Darcy, o fluxo subsuperficial  $q_i$  por unidade de contorno ( $m^2/h$ ) pode ser descrito através da Equação 4.

$$q_i = T_o \cdot e^{-\frac{s}{m}} \cdot \text{tg}\beta \quad (4)$$

em que:

$q_i$  - fluxo subsuperficial por unidade de comprimento do contorno ( $m^2/h$ ).

Na hipótese (H4) a taxa de recarga da zona saturada  $r$  ( $m/h$ ) é constante no espaço, sendo obtida pela Equação 5.

$$q_i = r \cdot a_i \quad (5)$$

em que:

$r$  - taxa de recarga que mantém a lâmina de água saturada ( $m/h$ ).

Através da hipótese (H4), pode-se assumir que o fluxo entre as zonas não-saturada e saturada ocorre de maneira uniforme e simultânea para toda a bacia hidrográfica analisada (IORGULESCU; JORDAN,1994).

Combinando as equações (4) e (5), e explicitando o valor da profundidade da superfície de saturação, obtém-se a Equação 6, onde:

$$z_i = -\frac{1}{f} \ln \frac{r \cdot a_i}{T_0 \cdot \text{tg} \beta_i} \quad (6)$$

Através da integração da Equação (6), pode-se obter o valor médio da profundidade da superfície da zona saturada, pela Equação 7.

$$\bar{z} = -\frac{1}{A} \sum_i \frac{1}{f} \ln \frac{r \cdot a_i}{T_0 \cdot \text{tg} \beta_i} \quad (7)$$

em que:

$A$  - área total da bacia (m<sup>2</sup>);  $\bar{z}$  - profundidade média da superfície de saturação na bacia (m).

Combinando as Equações (6) e (7), a diferença entre o valor médio na bacia e os valores locais, em cada ponto  $i$ , da profundidade da superfície de saturação pode ser expresso pela Equação 8:

$$z_i - \bar{z} = -\frac{1}{f} \ln \frac{r \cdot a_i}{T_0 \cdot \text{tg} \beta_i} + \frac{1}{A} \sum_i \frac{1}{f} \ln \frac{r \cdot a_i}{T_0 \cdot \text{tg} \beta_i} \quad (8)$$

Considerando que a recarga ( $r$ ) é espacialmente uniforme, portanto constante para toda bacia, obtém-se a Equação 9.

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

em que:

$\Psi$  - valor médio de  $\ln T_0$ ;  $\lambda$  - valor médio do índice topográfico para toda a bacia.

Reescrevendo a equação (9) em termos do déficit de armazenamento da zona saturada, obtém-se a Equação 10.

$$S_i = \bar{S} + \left( \lambda - \ln \frac{a_i}{tg\beta_i} \right) \cdot m \quad (10)$$

em que:

$S_i$  - déficit de armazenamento da zona saturada;  $\bar{S}$  - déficit médio de armazenamento da zona saturada na bacia.

Analisando a Equação (9), nota-se que a profundidade da superfície de saturação no ponto  $i$ ,  $z_i$  é função linear do índice topográfico, já que a profundidade média  $z$  e o índice topográfico médio  $\lambda$  são constantes para toda a bacia. Desse modo, verifica-se que todos os pontos da bacia que apresentam o mesmo índice topográfico possuem também comportamento hidrológico semelhante, o que é denominado de *similaridade hidrológica* (BEVEN *et al.*, 1995).

A partir do mapa de índice topográfico (dado de entrada para o modelo), constrói-se a função índice topográfico *versus* percentual da área da bacia, sendo a área em estudo dividida em um número de classes de índice topográfico, e os elementos da bacia que pertencem à mesma classe de índice topográfico são considerados pelo modelo em conjunto. Assim, todas as variáveis são calculadas para cada uma das classes definidas, e não para todos os pontos da bacia, reduzindo significativamente a dimensão do problema.

No modelo, o escoamento superficial é gerado apenas sobre uma pequena fração da área total da bacia hidrográfica, a qual se torna saturada durante eventos chuvosos; sendo produzido quando a precipitação atinge essas áreas ou quando o fluxo subsuperficial retorna à superfície (XAVIER, 2007).

As áreas saturadas, denominadas áreas de contribuição, são variáveis, já que se expandem e se contraem sobre diferentes partes da bacia. A dinâmica dessas áreas é controlada pela topografia, pelas características hidráulicas do solo e pelas condições de umidade da bacia. O estado de umidade da bacia é alterado como função do equilíbrio relativo entre os volumes de entrada (precipitação) e de saída: evapotranspiração, fluxo superficial e subsuperficial (GONÇALVES, 2008).

### 2.2.3 Aplicação do modelo TOPMODEL em bacias brasileiras

Desde sua elaboração, Beven et al (1979), o modelo TOPMODEL vem sendo usado no Brasil por várias vertentes de pesquisas. O amplo espectro da formação dos pesquisadores interessados no TOPMODEL pode estar relacionado com as características do modelo. Trata-se de um modelo que leva em consideração os processos físicos e apresenta potencial para a previsão dos impactos decorrentes da alteração da cobertura vegetal e do uso do solo no comportamento hidrológico das bacias hidrográficas. Algumas dessas experiências estão relatadas, de forma resumida, a seguir.

Mine; Clark (1996) testaram o TOPMODEL na bacia hidrográfica do rio Belém, localizada na cidade de Porto Velho, Paraná, Brasil. O objetivo do trabalho foi explorar o potencial do modelo quando aplicado em situações onde não se dispõem de informações qualitativas e/ou quantitativas suficientes. A área de drenagem do rio Belém é 42 km<sup>2</sup>. A altitude varia de 1010m na cabeceira a 874,4m no exutório. A área de estudo foi dividida em duas sub-bacias: a do rio Belém rural (3,53km<sup>2</sup>) e a do rio Belém urbano (38,47km<sup>2</sup>).

O modelo foi testado em oito enchentes ocorridas em 1986, sendo que a enchente de 13/08/1986 serviu de base para calibração. A resolução utilizada para o cálculo do índice topográfico foi de 250m x 250m. Os resultados mostraram que, em termos médios, a eficiência do modelo foi 0,54, bem abaixo do recomendado na literatura (0,70), mas para as enchentes maiores atingiu eficiências superiores a 0,80, colocando o modelo como uma direção promissora na modelagem do escoamento. Dos oito eventos testados, três apresentaram um alto coeficiente de eficiência ( $E > 0,81$ ), com picos coincidentes. Os piores resultados foram para as enchentes menores.

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

O modelo foi aplicado para uma sub-bacia de 59 km<sup>2</sup>, tendo sua performance testada em períodos contínuos de 15 dias e em eventos isolados de chuva, cujas hidrógrafas produzidas tinham de 1 a 3 dias de duração. Os dados utilizados referiam-se às estações úmidas dos anos hidrológicos de 92/93 e 93/94. O índice topográfico foi gerado a partir do modelo digital de elevação com *grid* de 20m x 20m.

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, tais como: a representação das condições de entrada de precipitação e evapotranspiração não refletem a variabilidade espacial da bacia; a ausência de sensibilidade do modelo a certos parâmetros faz com que ocorra uma não equivalência entre os processos de escoamento simulados e observados; o uso de uma função exponencial para explicar o decaimento da condutividade hidráulica em função da profundidade ou do déficit de umidade pode não ser o mais adequado para todos os solos de uma bacia; entretanto, acrescentam que a introdução de modificações pode diminuir a simplicidade de cálculo do modelo, o que é um dos seus principais atributos.

Varella; Campana (2000) aplicaram o modelo TOPMODEL na bacia do rio Descoberto, Distrito Federal, Goiás, Brasil, cuja área de drenagem é de aproximadamente 114km<sup>2</sup>. O objetivo foi analisar a influência da resolução do MNT sobre o desempenho do modelo. Na análise da topografia da bacia, foram utilizados mapas topográficos em formato digital, que distribuídos espacialmente por Krigagem produziram o MNT. Para determinação do índice topográfico foram elaborados sete 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-se um conjunto ajustado de parâmetros para cada uma das resoluções espaciais testadas.

Nas diversas simulações realizadas, foram obtidos ajustes razoavelmente precisos em termos de volume, vazão e tempo de pico. No entanto, os valores de eficiência foram pequenos, indicando que o modelo não conseguiu reproduzir fielmente a

forma do hidrograma. Por isso, concluíram que a aplicação desta versão do modelo na bacia do rio Descoberto seria mais apropriada para utilizações em estudos de enchentes, onde o interesse está na vazão, tempo de pico e volume total escoado. Os autores ressaltaram a importância da determinação dos valores dos parâmetros  $m$  e  $T_0$ , para os quais o modelo apresentou maior sensibilidade, em particular  $T_0$ , que depende da resolução espacial do MNT.

Ranzini et al (2004) aplicaram o modelo TOPMODEL em uma bacia 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. A bacia, com área de 56ha, apresenta cobertura natural secundária, Mata Atlântica, elevação variando de 1228m a 1050m, perímetro de 3450m e declividade do canal de 7,1%. A precipitação foi obtida pela média de quatro pluviógrafos instalados na área; um linígrafo do tipo flutuador forneceu as cotas do nível d'água para cálculo da vazão com uma curva-chave; a evapotranspiração potencial foi calculada com o uso de um modelo senoidal.

Para uso do modelo foi gerado um MNT 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 que o modelo mostrou-se sensível aos parâmetros, sinalizando que a parte física do modelo refletiu os processos reais da bacia. A simulação para períodos longos apresentou eficiências muito baixas. Uma das razões seria a participação preponderante do escoamento superficial no escoamento direto, conforme observado por outros autores em trabalhos semelhantes. A simulação de eventos isolados mostrou uma melhor eficiência do modelo. Para um período de dois anos hídricos foram simulados 35 eventos, dos quais sete apresentaram uma eficiência de Nash e Sutcliffe superior a 0,7.

Ferreira (2004) aplicou o modelo TOPMODEL numa sub-bacia do ribeirão dos Marins, localizada no município de Piracicaba (SP), com área de drenagem de 20 km<sup>2</sup>. O trabalho teve como objetivo simular o comportamento hidrológico das vazões de eventos chuvosos dessa bacia hidrográfica, que apresenta características típicas das áreas agrícolas da região da bacia do rio Piracicaba, da qual o ribeirão Marins é

afluente. Na bacia, predominam os solos argissolos e 52% da área está ocupada pela cultura de cana-de-açúcar. Quatro resoluções (tamanhos de células – 30x30m, 50x50m, 70x70m e 100x100m) foram utilizadas para a construção dos modelos numéricos do terreno, concluindo-se que na medida em que o tamanho da célula aumenta ocorrem valores mais altos de índices topográficos.

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

Silva; Kobiyama (2007) aplicaram o modelo na bacia do Rio Pequeno, município de São José dos Pinhais, Paraná, para duas séries de dados correspondendo aos períodos de calibração e validação. O trabalho teve como objetivo comparar e avaliar três formulações do modelo hidrológico TOPMODEL na simulação de hidrogramas. A bacia tem aproximadamente 104 km<sup>2</sup>, apresentando uma topografia pouco acidentada e altitude variando de 895 m a 1.270 m. Os tipos de solos encontrados na bacia são: Organossolos, latossolos, argilissolos e cambissolos. O uso do solo na bacia é classificado em: Urbano (4%); Agricultura e/ou solo exposto (3%); Matas (54%), Campo (35%), Banhados e/ou várzeas (3%) e outros (1%). A precipitação média anual da região é de aproximadamente 1.400 mm.

A formulação original do TOPMODEL (BEVEN et al., 1984) foi denominada de MODELO 1, a formulação proposta por Campling et al. (2002) de MODELO 2 e a formulação de Datin (1998) apud Silva; Kobiyama (2007) de MODELO 3, as duas últimas formulações foram escolhidas porque ambas alteram o índice topográfico, um dos parâmetros principais do TOPMODEL.

Os modelos foram comparados através das suas eficiências, intervalos de incerteza e medidas de entropia de Shannon. Através das simulações foi observado o domínio de erros das estruturas dos modelos e/ou da entrada de dados sobre os erros no ajuste de parâmetros. Os modelos apresentaram desempenhos semelhantes quanto à simulação de hidrogramas. O MODELO 2 obteve os maiores intervalos de incerteza em todas as simulações e, por ter um parâmetro a mais, não foi recomendado para a simulação de hidrogramas nesta bacia.

Santos; Kobiyama (2008) aplicaram o modelo hidrológico TOPMODEL para determinar as áreas saturadas da bacia hidrográfica do rio Pequeno, com área de drenagem de 134 km<sup>2</sup>, localizada no município de São José dos Pinhais, Região Metropolitana de Curitiba, Paraná. A precipitação média anual da região é de aproximadamente 1.400 mm, bem distribuída durante o ano. Os mapas de áreas saturadas foram analisados frente ao uso do solo e às áreas de preservação permanente, com mata ciliar.

O TOPMODEL apresentou boa aderência entre as vazões observadas e calculadas, resultando em um valor  $E \approx 0,7$ , ficando acima desse valor em quatro dos seis períodos simulados, confirmando sua eficiência em regiões de clima úmido e relevo suave. De maneira geral, os valores dos parâmetros de entrada do TOPMODEL ficaram muito próximos dos valores calculados previamente, ou seja, mantiveram-se coerentes com as grandezas físicas às quais estão associados.

O modelo apresentou sensibilidade à inconsistência dos dados observados de precipitação, ressaltando a necessidade de dados observados de boa qualidade e com discretização temporal adequada. Os resultados das simulações mostraram o grande potencial de aplicabilidade desse modelo no planejamento ambiental, pois permitem discutir e orientar as ações antrópicas sobre o meio físico com base no entendimento dos processos naturais.

Siefert; Santos (2010) aplicou o conceito de área hidrologicamente sensível (AHS), definidas como área de uma bacia hidrográfica mais propensa a atingir o estado de saturação do solo e produzir escoamento superficial. Tal estudo foi realizado na bacia do rio Barigui, com área de drenagem de 58,5 km<sup>2</sup>, localizada no município de Almirante Tamandaré, situado na Região Metropolitana de Curitiba (PR). Os autores definiram como AHS as áreas que permanecem saturadas mais de 30% do tempo. O mapa da distribuição espacial do índice topográfico foi obtido a partir do modelo digital do terreno hidrologicamente consistido, com resolução espacial de 5 m, construído a partir de cartas topográficas obtidas do levantamento altimétrico realizado para a área de estudo na escala de 1:10.000.

O modelo TOPMODEL foi utilizado para simular a dinâmica das zonas saturadas na bacia. e apresentou uma boa resposta em relação à vazão observada, confirmando bom desempenho em bacias de mesoescala, com clima úmido e relevo suave. As AHS's da bacia do rio Barigui totalizam 17,1 km<sup>2</sup> ou 27% da área total.

Considerando-se as AHS's como de interesse à preservação ambiental, obteve-se um acréscimo de 13,2 km<sup>2</sup> nas áreas de preservação permanente da bacia hidrográfica, delimitando-se assim um total de 44% da área da bacia como área de importância ambiental.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Área de estudo

##### 3.1.1 Localização e caracterização

O presente estudo foi desenvolvido na microbacia hidrográfica do córrego Jaqueira (MCJ), afluente do rio Alegre, pertencente à bacia hidrográfica do rio Itapemirim. A microbacia localiza-se próxima ao perímetro urbano da cidade de Alegre-ES, entre as seguintes coordenadas: latitude máxima de  $-20^{\circ}45'16,2''$  e mínima de  $-20^{\circ}45'36,72''$ ; longitude máxima de  $-41^{\circ}31'44,76''$  e mínima de  $-41^{\circ}31'25,32''$ ; com área de drenagem total de  $0,22 \text{ km}^2$  (Figura 4).

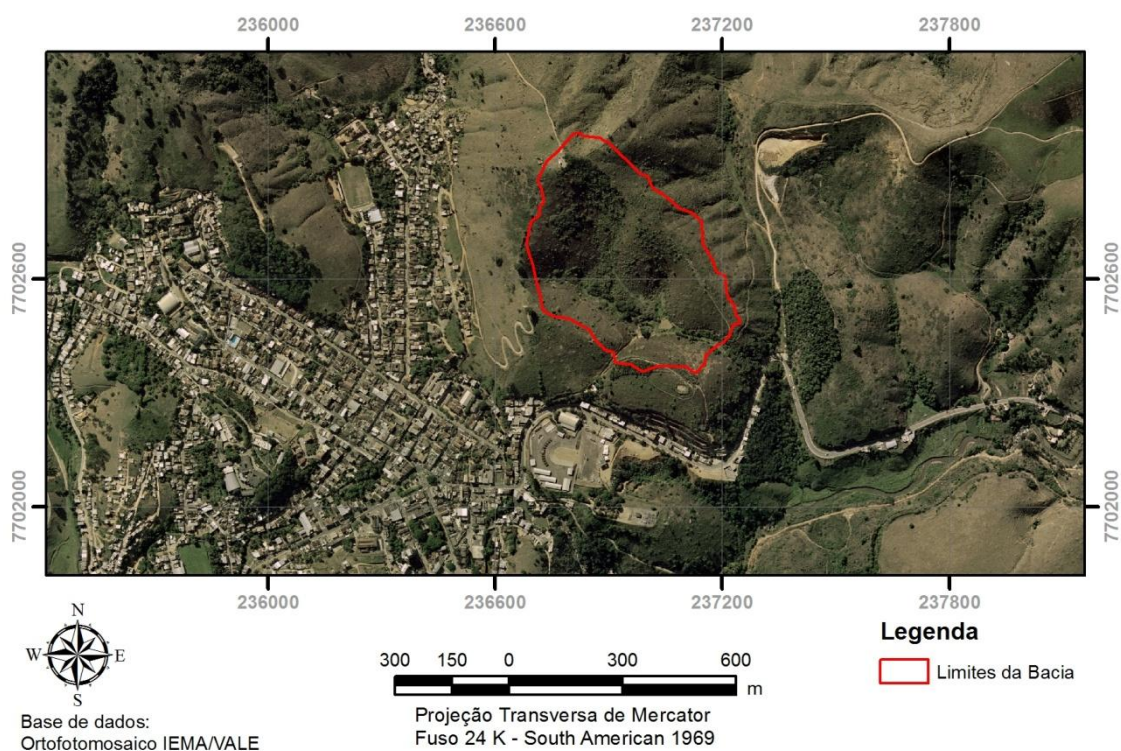


Figura 4 - Vista aérea da microbacia hidrográfica do córrego Jaqueira, Alegre-ES

O município de Alegre, segundo a classificação de Köppen, apresenta o tipo climático "Cwa", caracterizado como clima de inverno seco e verão chuvoso, com precipitação total anual média de 1341 mm e temperatura anual média de  $23,1 \text{ }^{\circ}\text{C}$  (LIMA et al., 2008).

A topografia da região se caracteriza por um relevo muito acidentado, intercalado por reduzidas áreas planas, ocorrendo o predomínio de áreas de pastagem, com escassos remanescentes florestais nativos, localizados principalmente nos topos dos morros.

Historicamente, a ocupação agrícola na MCJ passou por diversas fases. Iniciou-se há cerca de 60 anos, com a substituição da mata nativa para implantação de cafeicultura, que posteriormente cedeu espaço à pastagem extensiva.

Há cerca de 15 anos, as áreas de topo de morro e próximas aos cursos d'água foram cercadas, para dar início ao processo regenerativo da vegetação nativa. Atualmente, a área é exclusivamente destinada à preservação, onde a pequena parcela de cultivo agrícola, destinado à subsistência, é praticado de forma totalmente agroecológica, sem aplicação de fertilizantes químicos e agrotóxicos.

A microbacia do córrego Jaqueira já serviu de área experimental para o desenvolvimento de outros estudos.

Guariz (2008) realizou a caracterização morfométrica e a análise das características físicas do solo nos diferentes tipos de cobertura da microbacia, visando à implementação de melhores práticas de manejo e a adoção de técnicas físico-conservacionistas.

Santos (2010) aplicou os modelos HidroBacia, Método Racional e o Método Número da Curva, com o objetivo de avaliar o comportamento na simulação da lâmina de escoamento superficial (LES) e da vazão máxima de escoamento ( $Q_{m\acute{a}x}$ ) para oito eventos de chuva/vazão, testando diferentes combinações dos parâmetros de entrada do HidroBacia.

Fukunaga (2012) avaliou a aplicabilidade do modelo SWAT na estimação de séries de vazão na microbacia.

### 3.1.2 Imagens temáticas

#### 3.1.2.1 Modelo Numérico do Terreno (MNT)

As informações do relevo foram obtidas a partir da realização de um levantamento planialtimétrico da microbacia e adjacências por meio do GPS geodésico estático modelo GTR-A (TechGeo®). De posse destas informações, foi realizada a interpolação dos valores altimétricos para a obtenção do MNT, com resolução de 7m x 7m, a partir do software ArcGIS 9.3®, apresentado na Figura 5.

A versão do modelo TOPMODEL utilizada no presente estudo, possui restrição quanto ao número de linhas e colunas do arquivo de dados do MNT, sendo o máximo admitido 100 linhas e 100 colunas. A resolução adotada gerou um arquivo com 90 linhas e 81 colunas, impossibilitando a adoção de uma resolução menor.

As depressões indesejadas (Sinks), eventualmente geradas na interpolação, foram eliminadas visando deixar as informações de altitude consistentes do ponto de vista hidrológico, ou seja, toda célula da matriz de elevação possui no entorno pelo menos uma célula com altitude igual ou menor.

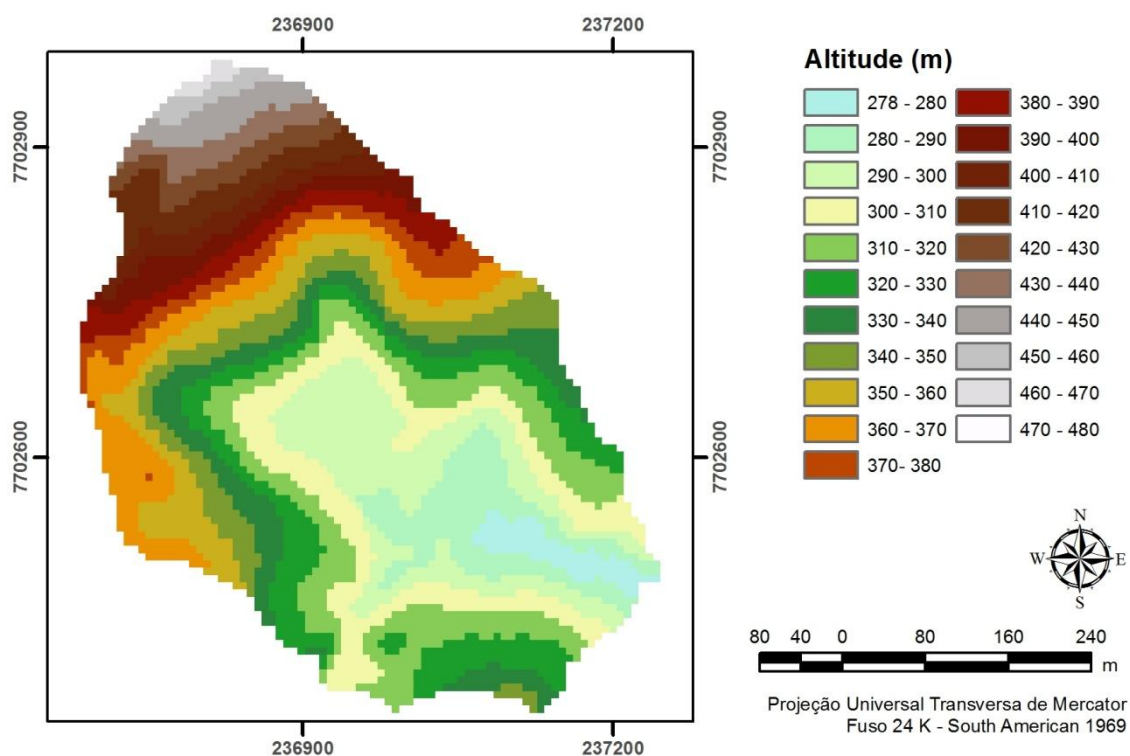


Figura 5 - Modelo Numérico do Terreno, resolução 7m x 7m.

### 3.1.2.2 Uso e ocupação do solo

Guariz (2008) e Santos (2010) realizaram um levantamento de uso e ocupação da MCJ, o qual permanece o mesmo, e a subdividiram em cinco diferentes tipos de cobertura do solo, descritos a seguir e apresentados na Figura 6.

Sítio 1: ocupado por pastagem (*Brachiaria decumbens*), com declividade média de 57%, ocupando 39% da área; Sítio 2: ocupado por pastagem (*Melinis minutiora* P. Beauv.) com formações arbustivas esparsas, com declividade média de 50%, ocupando 27% da área; Sítio 3: ocupado por eucalipto (*Eucalyptus grandis*), espaçamento de 3 x 2 metros, com aproximadamente 10 anos de idade, com declividade média de 44%, ocupando 10% da área; Sítio 4: ocupado por regeneração florestal em nível secundário, com declividade média de 55 %, ocupando 11% da área; Sítio 5: ocupado por regeneração vegetal nativa em nível primário, formado basicamente por uma única espécie, com declividade média de 42%, ocupando 13% da área.

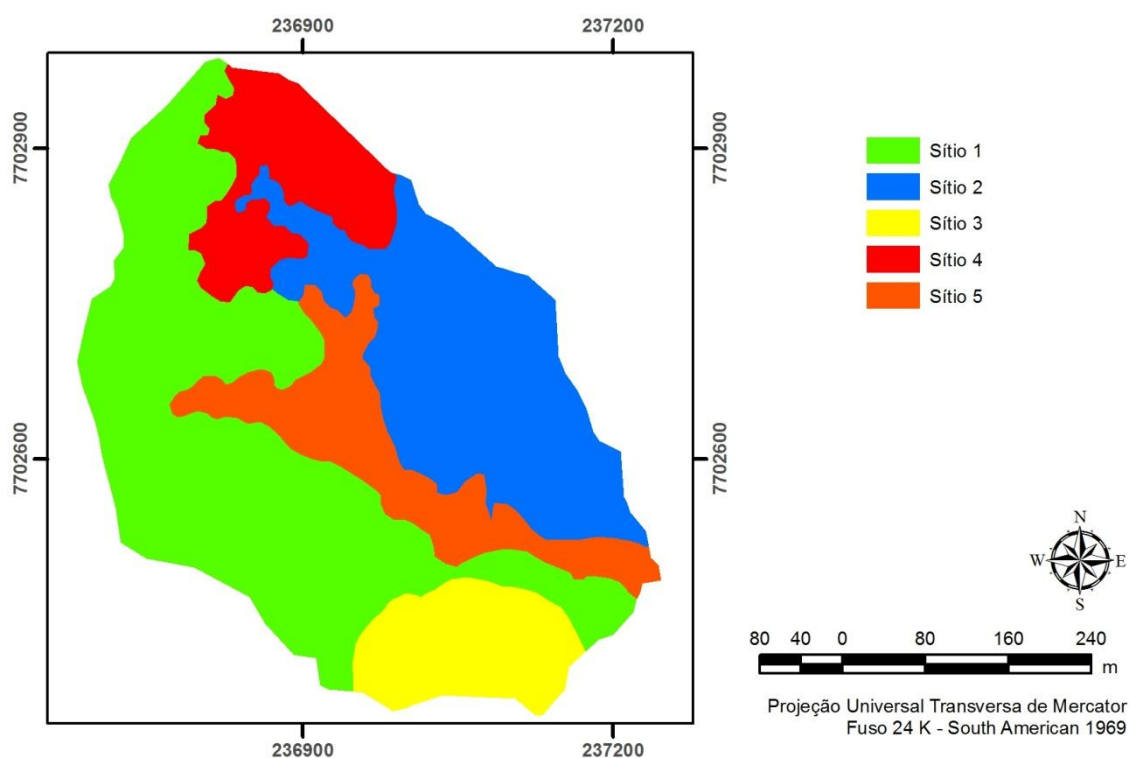


Figura 6 - Uso e ocupação do solo da área de estudo.  
Fonte: Adaptado de SANTOS (2010).

A divisão da área em diferentes feições foi importante na caracterização da microbacia em estudo, visto que cada feição tem um comportamento hidrológico diferente.

### 3.1.3 Diagnóstico físico da área

Guariz (2008) classificou o solo da microbacia do Córrego Jaqueira como Latossolo Vermelho-Amarelo. As características físicas do solo foram obtidas por meio de estudos realizados por Santos (2010), utilizando a metodologia proposta pela EMBRAPA (1997). Na Tabela 1 são apresentadas a fração granulométrica e, também, a classe textural segundo EMBRAPA (1999), para cada feição avaliada na MCJ.

Tabela 1 - Fração granulométrica do solo e classe textural para as diferentes coberturas do solo na microbacia em estudo

Sítio	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	Classe textural
1	49,07	9,65	41,28	Argilosa
2	48,22	7,22	44,56	Argilosa
3	46,75	10,21	43,04	Argilosa
4	46,55	13,53	39,92	Argilosa
5	61,83	9,18	28,99	Média

Fonte: SANTOS (2010)

Na Tabela 2, são apresentados os valores de porosidade total, macro e microporosidade, densidade do solo e de partículas para cada feição delimitada na MCJ.

A porosidade total (PT) foi obtida através da relação existente entre a densidade do solo ( $D_s$ ) e a densidade de partículas ( $D_p$ ), expressa pela Equação 11, de acordo com EMBRAPA (1997):

$$PT = 1 - \frac{D_s}{D_p} \quad (11)$$

Tabela 2 – Valores de densidade do solo ( $D_s$ ), densidade de partículas ( $D_p$ ), microporosidade (Micro), macroporosidade (Macro) e porosidade total (PT), para as diferentes coberturas do solo encontradas na microbacia

<b>Sítio</b>	<b><math>D_s</math> (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b><math>D_p</math> (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Micro (cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Macro (cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>PT (cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>)</b>
1	1,39	2,60	0,306	0,153	0,459
2	1,36	3,05	0,319	0,235	0,555
3	1,35	2,68	0,325	0,179	0,504
4	1,35	2,91	0,341	0,185	0,526
5	1,48	2,47	0,272	0,137	0,410

Fonte: SANTOS (2010)

Na Tabela 3 são apresentados os valores de umidade correspondente à capacidade de campo (CC) e ponto de murcha permanente (PMP), além da taxa de infiltração estável para cada feição delimitada na MCJ.

A taxa de infiltração estável de água no solo foi determinada, em campo, utilizando o método de anéis concêntricos, conforme descrito por Brandão et al. (2006).

Tabela 3 – Valores de umidade correspondente à capacidade de campo ( $\theta_{CC}$ ), ponto de murcha permanente ( $\theta_{PMP}$ ) e taxa de infiltração estável ( $T_{ie}$ ), nas diferentes coberturas do solo encontradas na microbacia

<b>Sítio</b>	<b><math>\theta_{CC}</math> (cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>)</b>	<b><math>\theta_{PMP}</math> (cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>)</b>	<b><math>T_{ie}</math> (mm/h)</b>
1	0,2433	0,1928	50,10
2	0,2534	0,2057	163,37
3	0,2588	0,2034	184,12
4	0,2611	0,2040	118,95
5	0,2136	0,1520	469,15

Fonte: SANTOS (2010)

A microbacia em estudo apresenta um único curso d'água perene, com 546,5m de comprimento e amplitude altimétrica de 89m, conforme apresentado na Figura 7.

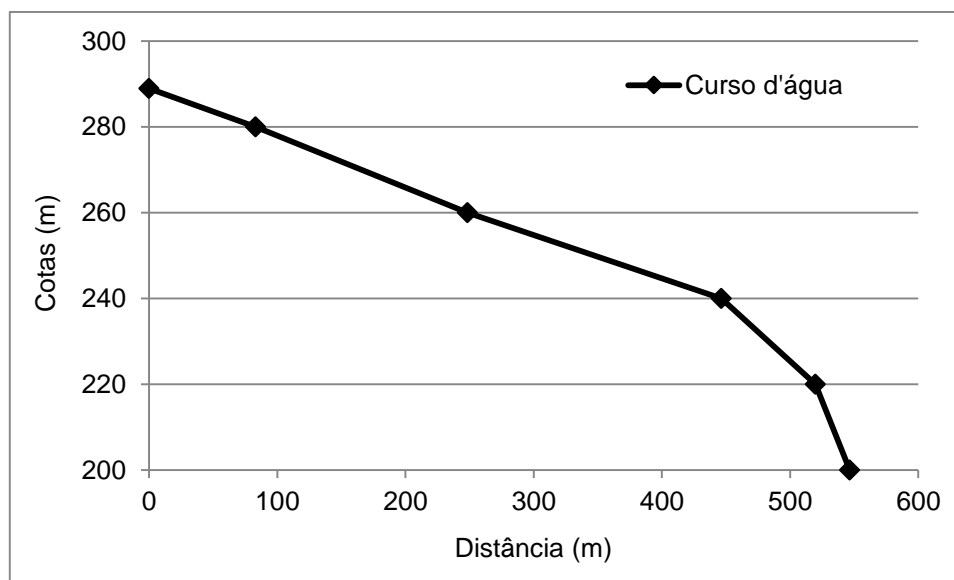


Figura 7 - Perfil longitudinal do curso d'água principal da microbacia

### 3.1.4 Monitoramento da precipitação e vazão

Os dados de precipitação foram obtidos de uma estação meteorológica instalada próximo ao exutório da MCJ (Figura 8A), sendo o monitoramento realizado no período de 19 de julho de 2009 a 28 de dezembro de 2011. A série de dados do ano de 2012 não foi utilizada devido ao grande número de falhas existentes.

A estação opera com um *datalogger*, configurado para medir e registrar, em intervalos de 3 minutos, os dados de precipitação (mm). Estes valores foram integrados em intervalos horários. A precipitação foi quantificada utilizando um único pluviógrafo, considerando que não houve variações espaciais significativas de precipitação na área, em função do tamanho da mesma (0,22 km<sup>2</sup>).

A vazão foi monitorada no exutório da microbacia, por meio de um vertedor triangular de parede delgada e ângulo de abertura de 90° (Figura 8B).

A carga hidráulica (h) sobre a soleira do vertedor foi medida com a utilização de um sensor de pressão (CS420, Campbell Scientific), programado para registrar os valores do nível de água a cada 3 minutos (Figura 8B).

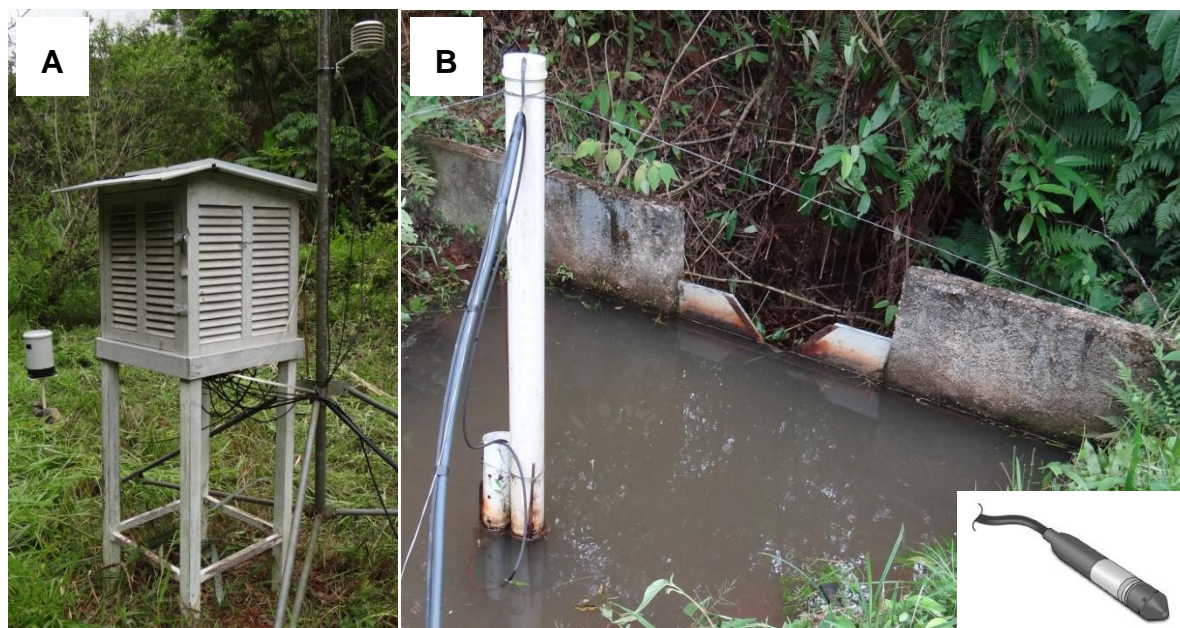


Figura 8 – Estação meteorologia automática (A) e vertedor construído no exutório da microbacia hidrográfica, com detalhe do sensor de pressão (B).

A curva de descarga (curva-chave) do vertedor foi definida em função das lâminas d'água sobre a estrutura vertente.

A equação utilizada para a conversão da lâmina d'água em vazão é a equação de Thompson (Equação 12).

$$Q = 1,4 \cdot h^{2,5} \quad (12)$$

em que:

$Q$  – vazão sobre o vertedor ( $m^3/s$ );  $h$  – carga hidráulica sobre o vertedor (m).

Como o linígrafo de pressão mede valores de carga hidráulica, fez-se necessário a calibração do vertedor para correlacionar os valores registrados aos de vazão. Para tanto, foram realizadas consecutivas medições da vazão pelo método direto. A partir das vazões medidas e suas respectivas lâminas d'água sobre o vertedor, obteve-se, por meio de um ajuste matemático, uma equação de Thompson modificada, sendo a vazão expressa em L/s e a carga hidráulica sobre o vertedor ( $h$ ) em centímetros. A equação obtida e o gráfico demonstrando o ajuste estão apresentados na Figura 9.

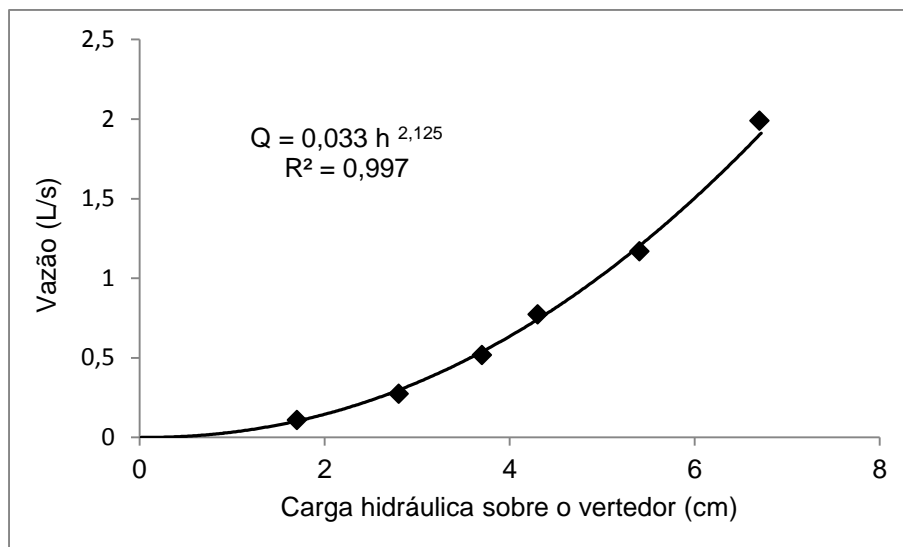


Figura 9 - Curva de calibração do vertedor para o linígrafo de pressão

Com a obtenção dos hidrogramas de escoamento do curso d'água, a partir do monitoramento da vazão para cada evento de precipitação, efetuou-se a separação entre o escoamento de base e o escoamento superficial. Para tanto, utilizou-se o método proposto por Tucci (2007), apresentado na Figura 10.

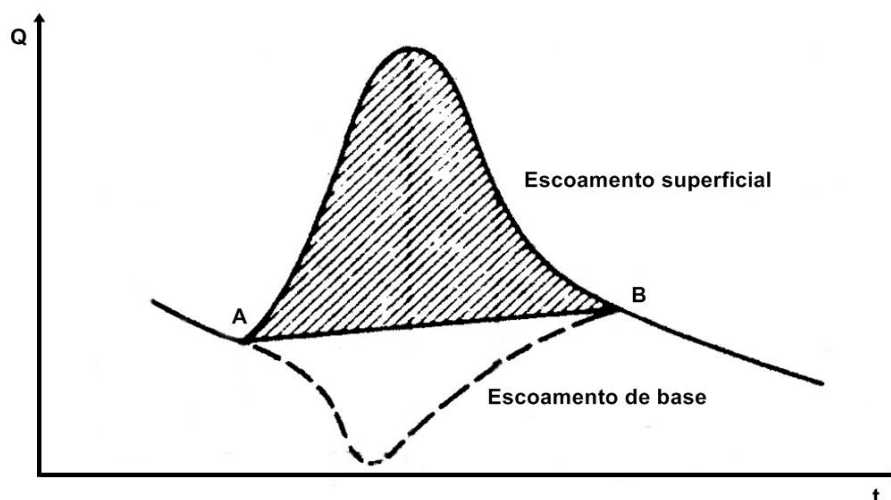


Figura 10 - Método de separação entre escoamento subterrâneo e superficial.  
Fonte: Adaptado de TUCCI (2007).

Segundo Tucci (2007), este é o método mais simples, pois consiste em ligar os pontos A e B por uma reta, obtendo-se a reta AB, sendo: ponto A, o início do hidrograma (início da inclinação da curva) e ponto B, fim do hidrograma. O ponto B é encontrado quando os valores de vazão tornam-se constantes. O hidrograma de

escoamento superficial equivale, portanto, à diferença entre o hidrograma total observado e a reta AB. Consequentemente, o volume de escoamento superficial é representado pela área acima da reta AB.

## **3.2 Aplicação do modelo TOPMODEL**

### **3.2.1 Dados de entrada**

Para aplicação do TOPMODEL são requeridos como dados de entrada: precipitação, evapotranspiração potencial e vazão observada, este último utilizado para comparação com a vazão simulada. O modelo utiliza um único parâmetro distribuído espacialmente: o índice topográfico (IT) que fornece um índice de similaridade hidrológica dos pontos da bacia.

O IT foi obtido por meio do software DTM 97.07, disponível gratuitamente no site <[http://www.es.lancs.ac.uk/hfdg/freeware/hfdg\\_freeware\\_dta.htm](http://www.es.lancs.ac.uk/hfdg/freeware/hfdg_freeware_dta.htm)>, que utiliza o MNT como dado de entrada e o algoritmo de direção múltipla de fluxo de QUINN et al. (1995) como forma de cálculo deste índice. Este algoritmo deriva o modelo numérico do terreno em um modelo de direção e acúmulo de fluxo, no qual obtém a área de drenagem de cada uma das células que formam a bacia e sua respectiva declividade, que posteriormente obtém o IT de cada pixel utilizando a equação 1.

Como se trata de simulação de eventos de curta duração, sendo utilizada a precipitação efetiva como dados de entrada, optou-se por atribuir valor zero à evapotranspiração, assim como adotado por Castilho (2005). Desta forma, considera-se que nos períodos de ocorrência dos eventos, a evapotranspiração é representada integralmente pela interceptação da vegetação, cujo efeito já está embutido na precipitação efetiva, ou seja, a transpiração vegetal e a evaporação do solo são negligenciadas.

O modelo considera, ainda, cinco parâmetros de entrada, apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Parâmetros de entrada do modelo TOPMODEL

Parâmetro	Descrição	Unidade
$m$	Armazenamento exponencial	m
$T_0$	Transmissividade efetiva do solo saturado	m <sup>2</sup> /h
$SR_{máx}$	Capacidade de água disponível na zona radicular	m
$SR_{init}$	Déficit inicial de umidade na zona radicular	m
ChVel	Velocidade de propagação em canal	m/h

Os parâmetros  $m$  e  $T_0$  por não se ter medidas de campo, devido à escassez de dados que fornecessem um indicativo dos valores dos parâmetros requeridos pelo modelo TOPMODEL foram determinados com suporte em valores utilizados por diversos autores, sendo apresentados na Tabela 5, e obtidos no processo de calibração (item 3.2.3).

Tabela 5 – Intervalos dos parâmetros  $m$  e  $\ln(T_0)$  utilizados nas simulações pelo método de Monte Carlo.

Parâmetro	Intervalo dos parâmetros	
	Mínimo	Máximo
$m$	0,00315 <sup>1</sup>	1,4999 <sup>2</sup>
$\ln(T_0)$	-7,013116 <sup>3</sup>	9,47124 <sup>4</sup>

Fonte: <sup>1</sup>Ferreira (2004); <sup>2</sup>Franchini et al. (1996); <sup>3</sup>Peters et al. (2001); <sup>4</sup>Beven; Freer (2001)

A capacidade máxima de água disponível na zona radicular ( $SR_{máx}$ ) foi calculada a partir dos valores de capacidade de campo, ponto de murcha permanente e profundidade efetiva do sistema radicular das culturas. Pode-se calcular o parâmetro através da Equação 13.

$$SR_{máx} = (\theta_{cc} - \theta_{pmp}) \cdot Z \quad (13)$$

em que:

$\theta_{cc}$  – umidade da capacidade de campo (cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>);  $\theta_{pmp}$  – umidade do ponto de murcha permanente (cm<sup>3</sup>/cm<sup>3</sup>) e  $Z$  – profundidade efetiva do solo (m).

A profundidade média do perfil na MCJ foi considerada igual a um metro. O valor de  $SR_{máx}$  foi obtido através da média ponderada para os diferentes tipos de cobertura vegetal da bacia.

O déficit inicial de umidade na zona radicular ( $SR_{init}$ ) foi calculado empregado-se o mesmo valor utilizado por Schuler (1998) e Ferreira (2004), ou seja, 40% de  $SR_{máx}$ . Esse procedimento foi adotado levando-se em conta que esse parâmetro depende somente dos eventos anteriores, assim, inicialmente considerou-se que as condições de umidade dos solos fossem intermediárias.

A velocidade de propagação em canal ( $ChVel$ ) foi calculada, pela Equação 14, considerando o intervalo de tempo entre o instante que ocorre uma chuva intensa no ponto mais distante da bacia e o instante da resposta, quando ocorre a vazão máxima, ou seja, o tempo de concentração.

$$ChVel = \frac{d}{t_c} \quad (14)$$

em que:

$ChVel$  – velocidade de propagação em canal, m/s;  $d$  – comprimento do canal principal da bacia, m;  $t_c$  – tempo de concentração, minutos.

Para o cálculo do tempo de concentração foi utilizada a equação de Kirpich (Equação 15).

$$t_c = 57 \left( \frac{L^3}{H} \right)^{0,385} \quad (15)$$

em que:

$t_c$  – tempo de concentração, minutos;  $L$  – comprimento do talvegue, Km;  $H$  – diferença de nível entre o ponto mais remoto da bacia e a seção de deságue, m.

### 3.2.2 Escolha dos eventos utilizados nas simulações

No processo de simulação foram escolhidos eventos no período de julho de 2009 a dezembro de 2011. Como critério de escolha, foram selecionados os eventos de precipitação que geraram escoamento superficial. A partir desse critério, foram selecionados 20 eventos (Tabela 6), que foram separados nos processos de calibração e validação.

Tabela 6 - Eventos escolhidos para aplicação do modelo TOPMODEL: Precipitação total ( $P_T$ ), intensidade de precipitação máxima ( $I_{p\text{máx.}}$ ), intensidade de precipitação média ( $I_{p\text{méd.}}$ ), lâmina de escoamento superficial ( $LES_{\text{obs}}$ ) e vazão máxima de escoamento superficial observada ( $Q_{\text{máx.obs}}$ ).

Evento	Data	Duração (min)	$P_T$ (mm)	$I_{p\text{máx.}}$ (mm/h)	$I_{p\text{méd.}}$ (mm/h)	$LES_{\text{obs}}$ (mm)	$Q_{\text{máx.obs}}$ (L/s)
1	19/07/2009	99	21,3	106,6	12,7	0,23	6,07
2	14/12/2009	141	13,7	30,4	5,8	0,05	1,46
3	14/12/2009	123	19,3	40,6	9,2	0,15	3,63
4	18/12/2009	159	19,3	45,7	7,2	0,10	2,75
5	11/03/2010	57	8,1	20,3	8,5	0,08	1,63
6	12/03/2010	72	22,8	66,0	18,8	0,19	6,30
7	12/03/2010	33	19,0	81,2	34,6	0,20	7,10
8	07/11/2010	159	28,9	50,8	10,2	0,09	2,47
9	07/11/2010	165	28,4	45,7	10,3	0,41	7,90
10	23/11/2010	48	24,4	111,7	30,1	0,32	8,78
11	03/12/2010	258	35,8	91,4	8,3	0,41	5,77
12	14/12/2010	90	28,9	96,5	19,1	0,19	5,27
13	15/12/2010	54	20,6	116,8	22,0	0,27	7,74
14	23/02/2011	402	139,1	182,8	20,7	3,29	28,83
15	28/02/2011	195	38,8	66,0	11,9	0,16	2,54
16	12/10/2011	120	25,1	50,8	12,5	0,03	0,74
17	17/10/2011	255	74,4	142,2	17,5	0,52	6,07
18	15/11/2011	141	34,8	45,7	14,8	0,05	1,00
19	28/12/2011	21	11,1	66,0	31,2	0,05	1,45
20	28/12/2011	129	32,8	86,3	17,7	0,12	3,29

Seguindo os critérios estabelecidos para a escolha dos eventos para uso na calibração do modelo TOPMODEL, foram selecionados, ao acaso, os eventos 2, 4, 8, 12, 13 e 16, os quais representam 30% do número total de eventos disponíveis para o presente estudo. Os 14 eventos restantes foram utilizados no processo de validação.

### 3.2.3 Calibração e validação

Por se tratar de um modelo de base física, os parâmetros envolvidos nos processos do TOPMODEL também possuem representatividade física. Isto possibilita a estimativa preliminar dos mesmos, desde que se disponha de dados observados. A partir da estimativa preliminar dos parâmetros, é possível ajustar o modelo com um mínimo de calibração.

No processo de calibração foram utilizados os parâmetros para os quais o modelo apresenta maior sensibilidade, que segundo Varella; Campana (2000) são  $m$  e  $T_0$ .

A determinação dos melhores valores destes parâmetros constituiu-se através da geração de mil simulações aleatórias pelo método de Monte Carlos dos intervalos válidos dos parâmetros. Sendo que a escolha do parâmetro se deu a partir do conjunto que melhor representou a concordância entre as vazões observadas e simuladas, através do coeficiente de eficiência (E) para cada evento.

Cabe ressaltar que todos os outros parâmetros de entrada ( $SR_{max}$ ,  $SR_{init}$ , ChVel) permaneceram constantes durante o processo de calibração.

Após a obtenção do conjunto dos parâmetros que apresentaram a melhor concordância de cada evento, foi obtido um valor médio dos parâmetros, considerando apenas os eventos que apresentaram um coeficiente E positivo, obtendo-se, assim, os parâmetros de entrada calibrados.

O processo de validação consistiu na utilização dos parâmetros calibrados para a simulação dos 14 eventos restantes, sem realizar nenhum tipo de ajuste adicional.

### 3.3 Índices de avaliação

Os resultados avaliados foram os hidrogramas de escoamento superficial e suas respectivas vazões máximas ( $Q_{\text{máx}}$ ) e lâminas escoadas (LES), para todos os eventos de precipitação simulados, por meio da comparação entre os dados observados e os dados simulados pelo modelo TOPMODEL.

A análise estatística foi realizada calculando-se os índices mais utilizados atualmente para avaliação do desempenho de modelos hidrológicos e hidroclimáticos. Dentre eles, estão o coeficiente de eficiência ( $E$ ), que vem sendo utilizado para a avaliação de modelos hidrológicos. Nash; Sutcliffe (1970) definiram este índice, que varia de  $-\infty$  a 1, com os maiores valores indicando melhor performance, por intermédio da Equação 16.

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - E_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (16)$$

Erro absoluto médio (EAM) e a raiz do quadrado médio do erro (RQME), propostos por Legates e McCabe Jr. (1999), expressos pelas Equações 17 e 18 respectivamente.

$$EAM = \frac{\sum_{i=1}^n |O_i - E_i|}{n} \quad (17)$$

$$RQME = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - E_i)^2}{n}} \quad (18)$$

onde:

$O_i$  – Valor observado de vazão no tempo  $i$ ;  $E_i$  – valor simulado de vazão no tempo  $i$ ;  
 $\bar{O}$  - valor médio da vazão observada;  $n$  – número de observações.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Dados de entrada

#### 4.1.1 Índice topográfico

Para o cálculo do índice topográfico (IT), foi utilizado apenas o MNT, com resolução espacial de 7m. O resultado da espacialização do índice topográfico é apresentado nas Figura 11 e Figura 12, em mapa e em histograma de frequência.

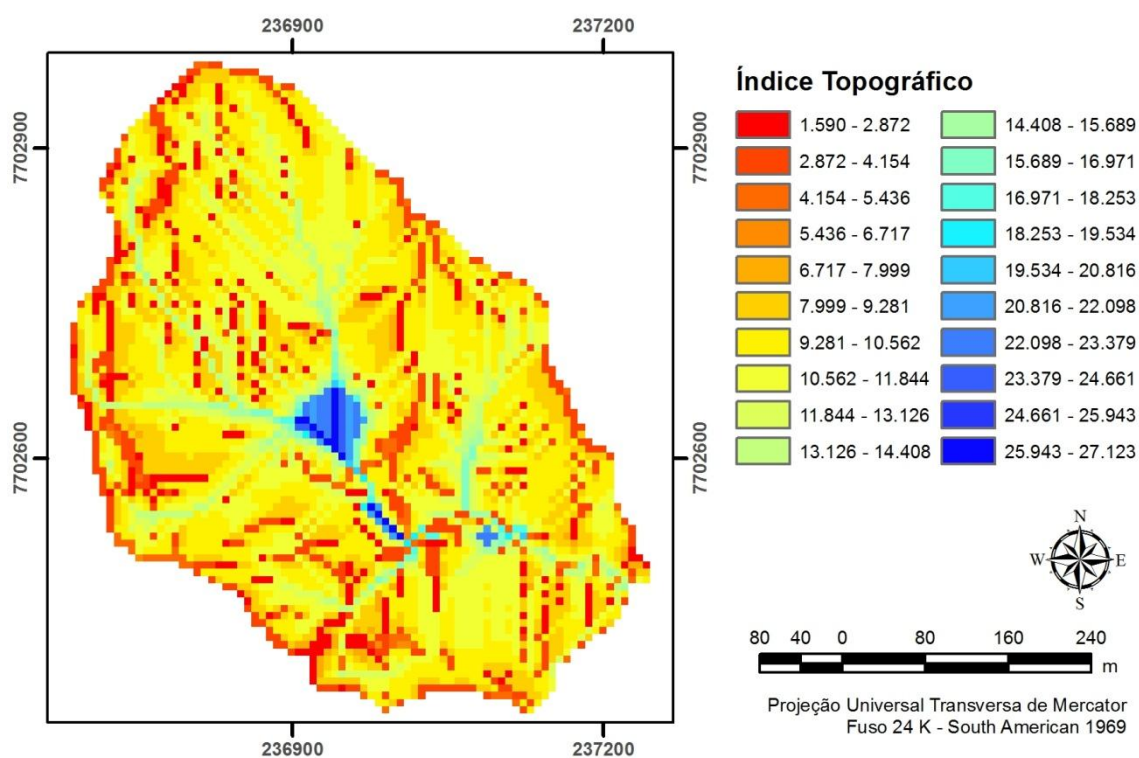


Figura 11– Padrão espacial do índice topográfico na microbacia estudada.

Os resultados obtidos mostram que os valores mais altos de IT foram encontrados em elementos associados à rede de drenagem e, ou, a depressões do terreno, enquanto que os menores valores foram encontrados em regiões com declive mais acentuado. Isto se deve ao fato do IT ser em função da declividade, estando sujeito a seguinte restrição:  $0^\circ < \beta < 90^\circ$ . Logo, quando os valores de declividade são próximos a  $0^\circ$ , o pixel da bacia poderá apresentar um valor alto de IT, quando este relevo plano estiver combinado com uma grande área de contribuição à montante. Em contrapartida, elevadas declividades e pequenas áreas de contribuição, irão

condicionar a ocorrência valores baixos de IT. Assim, quanto maior o valor do IT comparativamente em uma bacia hidrográfica, maior será a sua propensão a atingir o estado de saturação e apresentar um maior escoamento superficial (SIEFERT, 2012).

Os valores de IT calculados para a bacia variaram entre 1,59 e 27,22, sendo que células com índice topográfico com valor 10,56 apresentaram maior valor de frequência relativa. O índice topográfico médio da bacia foi de 10,11.

Valores semelhantes de IT foram encontrados por Silva; Kobiyama (2007), em estudo realizado em uma bacia Paranaense com aproximadamente 104 km<sup>2</sup>, utilizando resolução espacial de 40m, onde o índice variou de 2,81 a 28,13, com valor médio de 8,00. Este fato indica que as condições de relevo das bacias são semelhantes, mesmo apresentando uma enorme discrepância em relação ao tamanho da área de drenagem e resolução espacial.

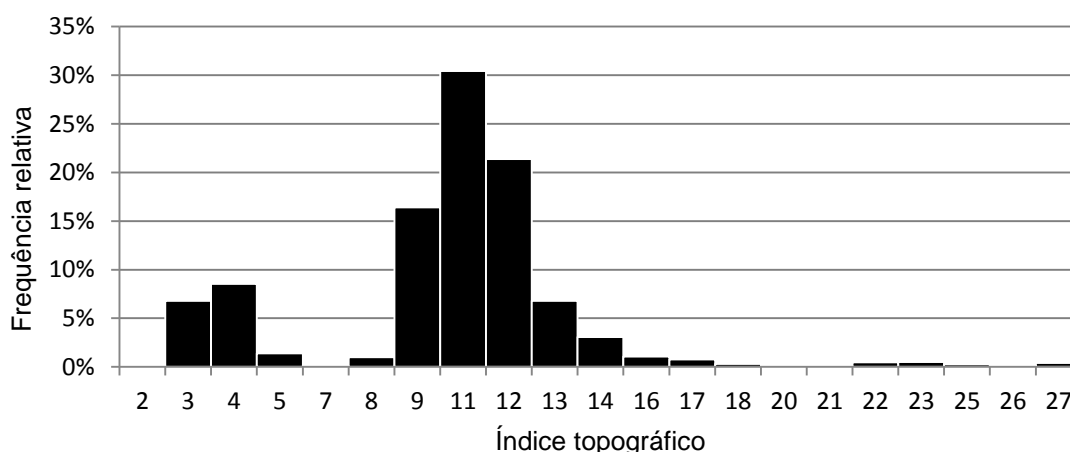


Figura 12 - Distribuição do índice topográfico na microbacia estudada

Na distribuição dos valores do índice topográfico (Figura 12), observa-se que na MCJ predominam áreas com índice topográfico entre 9 e 13. Estes valores são superiores aos obtidos por Ferreira (2004), utilizando resolução de 70m, para a bacia do Ribeirão dos Marins/SP (6 a 9), por Xavier (2002), utilizando resolução de 25m, para a sub-bacia do Rio Iguaçu/RJ (5 a 9) e por Santos (2001), utilizando resolução de 40m, para a bacia do Rio Pequeno/PR (5 a 8). Os maiores valores obtidos na MCJ se justificam pela maior presença de áreas com baixa declividade ou grandes áreas de contribuição.

Estudos realizados por Quinn et al. (1995), Varella; Campana (2000); Ferreira (2004) e Xavier (2007), avaliando o comportamento dos valores do índice topográfico para diferentes resoluções do MNT, mostraram que o índice topográfico apresenta uma distribuição diferenciada de acordo com a resolução espacial utilizada. Os autores verificaram que na medida em que o tamanho da célula aumenta, os valores do índice topográfico tendem a serem mais altos também, podendo indicar uma não representação dos pequenos canais e conseqüentemente uma menor precisão na representação da bacia. Portanto, deve-se ocorrer um ajuste entre a área superficial, o tamanho de célula e a precisão da informação para melhor representar a bacia na simulação. Ao utilizar um MNT com resolução de 7m X 7m, observou-se que os valores de índice topográfico estão coerentes com as características da microbacia, uma vez que áreas com elevadas declividades e/ou pequena área de contribuição apresentam um baixo valor de índice topográfico. Nota-se que, aproximadamente, 65% dos pixels da microbacia hidrográfica apresentam um valor de índice topográfico menor que 10,11.

#### 4.1.2 Parâmetros de entrada

O valor estimado de  $SR_{máx}$  foi de 0,0545m, sendo próximo ao mínimo de 0,058m encontrado por Ferreira (2004) e ao de 0,05m encontrado por Schuler et al. (2000). Tais valores são similares, também, aos encontrados por Varella; Campana (2000) e Xavier (2007). O parâmetro  $SR_{máx}$  está diretamente relacionado com as características físicas do solo e das culturas, estabelecendo condições aos processos de evapotranspiração e percolação (FERREIRA, 2004).

Para  $SR_{init}$  foi estimado um valor de 0,0218m. Este parâmetro especifica o estado inicial de umidade do solo, sendo expresso em déficit de armazenamento na zona das raízes, assumindo um único valor no modelo, válido para toda a bacia.

Santos; Kobiyama (2008) consideraram um único valor de  $SR_{init} = 0,001m$  para simulação de todos os eventos numa bacia de 104 km<sup>2</sup>. Coelho (2003) trabalhou com valor fixo de 0,002m para  $SR_{init}$ , e os resultados de eficiência para os eventos de calibração variaram de 61% a 81%. Em Ranzini (2002) a variação de  $SR_{init}$  foi de 0,01311m a 0,03717m e de eficiência, 75% a 86%. Santos (2009) destaca que este parâmetro está relacionado a condição antecedente de umidade do solo da bacia

hidrográfica, sendo o único parâmetro de entrada do modelo que pode variar no tempo. Por maiores que foram as diferenças entre os valores de  $SR_{init}$  encontrados para a MCJ e os autores citados anteriormente, sua influência nos resultados do modelo é muito pequena, mostrando que essas diferenças são inexpressivas durante as simulações.

O valor estimado para a velocidade de propagação em canal ( $ChVel$ ) foi de 7212 m/h, sendo próximo ao estimado por Schuler et al. (2000), o dobro do estimado por Xavier et al. (2003) e cerca de seis vezes superior ao estimado por Siefert; Santos (2010). O valor de  $ChVel$  depende das condições físicas do canal (leito, margem e declividade) e das condições que determinam a formação e distribuição dos volumes do escoamento (estrutura da precipitação e umidade do solo) (FERREIRA, 2004).

## 4.2 Calibração

Para cada evento foi ajustado o melhor conjunto de valores dos parâmetros para estimar as vazões, procurando um melhor ajuste das hidrógrafas entre os valores simulados e observados. Estes valores são apresentados na Tabela 7 juntamente com os valores do coeficiente de eficiência ( $E$ ).

Tabela 7 - Valores do parâmetros:  $m$  - parâmetro de armazenamento exponencial (m);  $Ln(T_0)$  - logaritmo natural da transmissividade efetiva do solo saturado ( $m^2/h$ );  $SR_{máx}$  - capacidade de água disponível na zona radicular (m);  $SR_{init}$  - déficit inicial de umidade na zona radicular (m);  $ChVel$  - velocidade de propagação em canal (m/h). do modelo TOPMODEL e do coeficiente de eficiência ( $E$ ) dos eventos de calibração.

Evento	Data	$m$	$Ln(T_0)$	$SR_{máx}$	$SR_{init}$	$ChVel$	$E$
2	14/12/2009	0,2995	-0,8249	0,0545	0,0218	7212	0,1224
4	18/12/2009	0,3538	3,9727	0,0545	0,0218	7212	0,1005
8	07/11/2010	0,6675	-2,5138	0,0545	0,0218	7212	-0,4794
12	14/12/2010	0,4193	-5,5747	0,0545	0,0218	7212	0,5949
13	15/12/2010	0,5011	0,4204	0,0545	0,0218	7212	0,5636
16	12/10/2011	0,8390	5,8613	0,0545	0,0218	7212	0,2252

O parâmetro  $m$ , de acordo com Beven et al., (1984) e Mine; Clarke (1996), é o mais importante do modelo para o controle da resposta hidrológica, pois influencia as áreas de contribuição e, portanto, a parcela da precipitação que irá se tornar escoamento superficial. Este parâmetro também possui relação direta com a contribuição de água para a vazão subsuperficial considerada no modelo.

Os resultados calculados de  $m$  para todos os eventos apresentaram valor mínimo de 0,2995 e valor máximo de 0,8390. Estes valores estão dentro da faixa de valores utilizada por Buytaert et al. (2003), entre 0,0 e 1,0, e acima dos valores máximos calculados por Varella & Campana (2000), Schuler *et al.*, (2000) e Siefert (2012), de 0,17, 0,20 e 0,18, respectivamente. Pelas considerações de Saulnier (1996), o parâmetro  $m$  é o controlador da profundidade efetiva do solo, sendo que, um valor elevado do mesmo indica um perfil mais condutor de água, enquanto que valores inferiores estão associados a uma menor condutividade no perfil do solo. Portanto, constata-se que os solos da MCJ possuem perfis mais profundos e mais condutores de água, comparativamente aos solos das bacias estudadas pelos autores acima citados.

Os valores do parâmetro  $\ln(T_0)$  ajustados para a bacia variaram entre  $-5,5747\text{m}^2/\text{h}$  e  $5,8613\text{m}^2/\text{h}$ , escala esta que abrange o valor de  $0,6974\text{m}^2/\text{h}$  encontrado por Ferreira (2004), em uma bacia de uso agrícola sob predomínio de argissolos, e de  $0,11\text{ m}^2/\text{h}$  a  $3,50\text{ m}^2/\text{h}$  encontrados por Silva; Kobiyama (2007). Siefert; Santos (2010) estimaram um valor de  $-2,20\text{m}^2/\text{h}$  na bacia do rio Barigui, com área de  $58,5\text{ km}^2$ , valor este próximo ao encontrado para o evento 8 ( $-2,5138\text{ m}^2/\text{h}$ ).

Os valores estimados para as condições da MCJ apresentaram uma variação alta, quando comparados aos estimados em outras áreas, podendo indicar que a condutividade hidráulica nesta bacia apresenta uma variabilidade maior. Schuler et al. (2000) observaram, que durante o processo de calibração do modelo TOPMODEL, o parâmetro transmissividade ( $\ln(T_0)$ ) era influenciado pela resolução espacial, podendo assim, perder o significado físico e atingir valores frequentemente superiores aos obtidos em campo.

A análise da qualidade de uma simulação é, em geral, realizada através da medida de aderência entre as vazões observadas e simuladas. O coeficiente de eficiência ( $E$ ) indica que quanto melhor o ajuste entre os dois conjuntos de valores, mais

próximo de 1 é o valor  $E$ . Mine; Clarke (1996) citam que valores de  $E \geq 0,7$  indicam alta eficiência no ajuste do modelo.

Analisando a Tabela 7, observa-se que 5 dos 6 eventos selecionados apresentaram valores de  $E$  positivos e 2 deles apresentaram valor de  $E > 0,50$ . A obtenção do valor médio dos parâmetros para a bacia foi obtido a partir da média dos eventos com  $E$  positivo, apresentando uma eficiência média com valor de  $E = 0,3213$ . Segundo Coelho (2003), valores negativos de eficiência indicam que seria preferível adotar todas as vazões sempre iguais ao seu valor médio ao usar as estimativas do modelo.

Os parâmetros obtidos pelo método de Monte Carlo com os melhores coeficientes de eficiência foram aplicados para a simulação dos 6 eventos selecionados para o processo de calibração no modelo. Os principais resultados obtidos nestas simulações estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Eventos de calibração – precipitação total ( $P_T$ ), vazão máxima simulada ( $Q_{m\acute{a}x.sim}$ ) e lâmina de escoamento superficial simulada ( $LES_{sim}$ )

<b>Evento</b>	<b>Data</b>	<b>Duração (min)</b>	<b><math>P_T</math> (mm)</b>	<b><math>Q_{m\acute{a}x.sim}</math> (L/s)</b>	<b><math>LES_{sim}</math> (mm)</b>
2	14/12/2009	141	13,7	0,43	0,02
4	18/12/2009	159	19,3	0,43	0,01
8	07/11/2010	159	28,9	0,63	0,04
12	14/12/2010	90	28,9	2,14	0,12
13	15/12/2010	54	20,6	2,44	0,06
16	12/10/2011	120	25,1	0,46	0,03

Os valores máximo (2,44L/s) e mínimo (0,43L/s) de vazão máxima simulados ( $Q_{m\acute{a}x.sim}$ ) ocorreram nos eventos 13, 2 e 4, respectivamente. Os valores simulados apresentaram subestimação, em relação aos valores observados, em todos os eventos. As lâminas de escoamento superficial simuladas também apresentaram resultados subestimados em relação aos observados, com exceção do evento 16 que apresentou valor igual ao observado (0,03mm), sendo que o valor máximo ocorreu no evento 12 e o mínimo no evento 4.

Na Figura 13 apresenta-se a porcentagem de variação das vazões máximas de escoamento superficial, observadas e simuladas, nos eventos selecionados para a calibração.

Nota-se que em todos os eventos o valor de vazão máxima ( $Q_{m\acute{a}x}$ ) simulado foi inferior ao observado, com valores variando de -38,16% a -100,00%, nos eventos 16 e 12 respectivamente. A variação média entre as vazões máximas observadas e simuladas foi de -72,74%. Esse valor médio foi influenciado pelo evento 12, que obteve menor eficiência. Com a retirada desse evento do cálculo da média, obteve-se o valor de -67,29%.

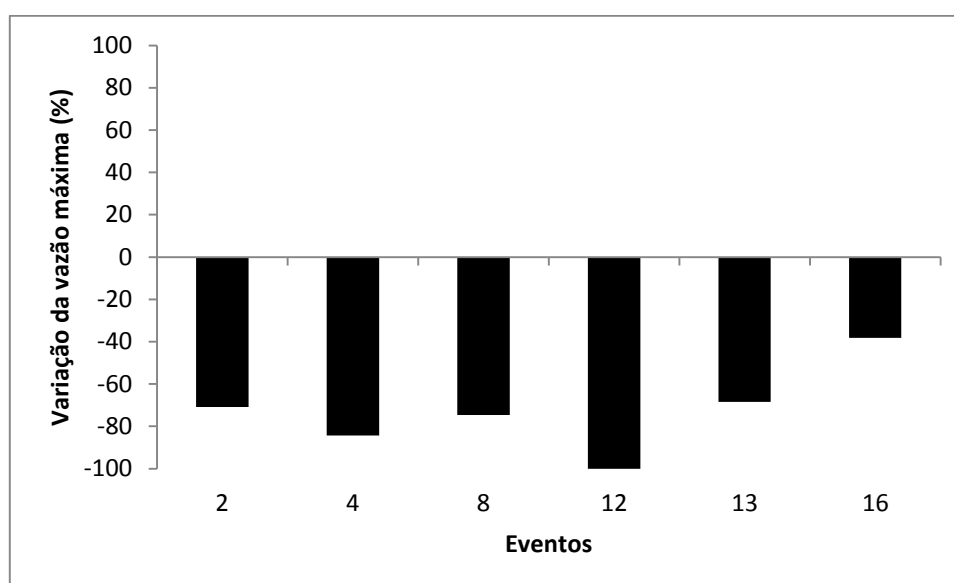


Figura 13 - Variação da vazão máxima observada e simulada para os eventos de calibração.

Castilho (2005) obteve, no processo de calibração, os valores de vazão máxima variando de 0,9% a 16,2%, com uma variação média de 3,4% (em módulo, 4,8%), com 80% dos eventos apresentando valores subestimados de vazão máxima simulada. Ferreira (2004) obteve uma variação dos valores de vazão máxima observada e simulada de -22% a 58%, sendo o valor médio de 19,3% (em módulo, 25,4%). Considerando todos os eventos de calibração de Ferreira (2004), em 75% deles o modelo subestimou os valores de vazão máxima. Os resultados encontrados para a MCJ corroboram os encontrados por Castilho (2005) e Ferreira (2004), onde há uma tendência do modelo em subestimar os valores de  $Q_{m\acute{a}x}$ .

A variação entre os valores de lâmina de escoamento superficial (LES) observado e simulado é apresentada na Figura 14.

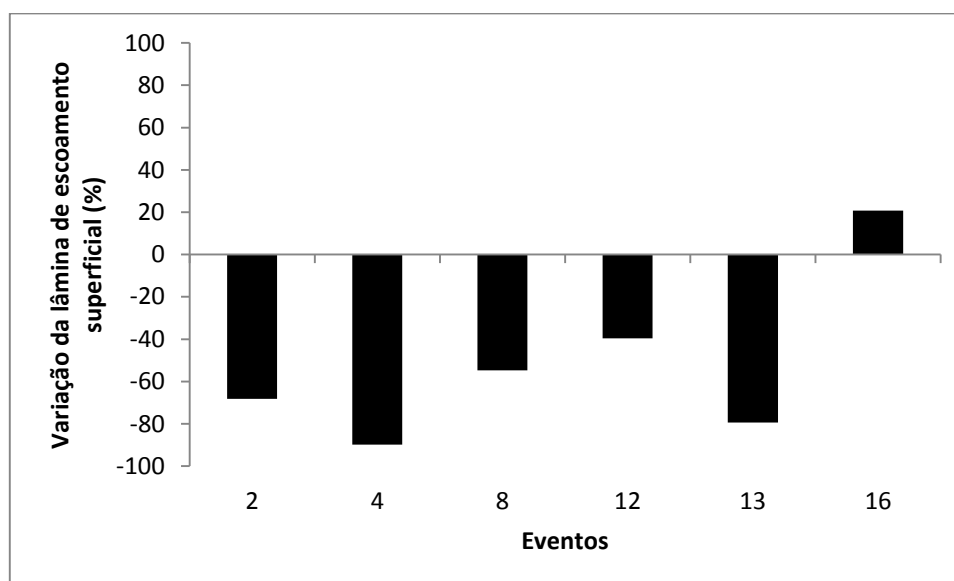


Figura 14 - Variação da lâmina de escoamento superficial observada e simulada para os eventos de calibração.

Dos eventos analisados para a bacia em estudo, apenas o evento 16 apresentou superestimação da LES. A faixa de variação encontrada para LES foi entre -89,77% a 20,81%, sendo estes limites verificados nos eventos 4 e 16, respectivamente. O valor médio da variação do volume foi de -51,80% (em módulo 58,73%). Retirando a influência do maior valor de variação, correspondente ao evento 4, o valor médio de variação passa para -44,20% (em módulo 52,53%). A retirada do evento 4 não gerou mudança significativa no valor de variação, visto que os demais eventos apresentaram valores superiores a 40% para subestimação da LES.

Situação contrária ocorreu nos estudos realizados por Ferreira (2004) e Castilho (2005), onde encontraram tendência de superestimação dos valores de LES. De modo que para Ferreira (2004) o valor médio dos eventos de calibração ficou na faixa de -61% a 12%, sendo o valor médio de -18,4% (em módulo, 21,7%), resultantes da superestimação em 75% dos eventos. Castilho (2005) obteve superestimação em 60% dos valores de volume escoado, com uma variação nos valores observados e simulados inferior a 5% e uma variação média de -0,78% (em módulo, 2,5%).

Na Tabela 9 são apresentados os valores finais dos parâmetros estabelecidos no processo de calibração.

Tabela 9 - Valores dos parâmetros do modelo TOPMODEL obtidos ao final do processo de calibração.

<b>Parâmetros</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
Armazenamento exponencial ( $m$ )	0,4826	m
Logaritmo natural da transmissividade efetiva do solo saturado ( $\ln(T_0)$ )	0,7710	m <sup>2</sup> /h
Capacidade de água disponível na zona radicular ( $SR_{máx}$ )	0,0545	m
Déficit inicial de umidade na zona radicular ( $SR_{init}$ )	0,0218	m
Velocidade de propagação em canal ( $ChVel$ )	7212	m/h

### 4.3 Validação

Realizou-se a modelagem hidrológica com o modelo TOPMODEL para os 14 eventos destinados à validação. Na Tabela 10 são apresentados os resultados obtidos nas simulações.

Tabela 10 – Resultados da validação do modelo TOPMODEL: vazão máxima de escoamento superficial simulada ( $Q_{máx.sim}$ ) e lâmina de escoamento superficial ( $LES_{sim}$ )

<b>Evento</b>	<b><math>Q_{máx.obs}</math></b>	<b><math>LES_{obs}</math></b>	<b><math>Q_{máx.sim}</math></b>	<b><math>LES_{sim}</math></b>
	<b>(L/s)</b>	<b>(mm)</b>	<b>(L/s)</b>	<b>(mm)</b>
1	6,07	0,23	1,32	0,09
3	3,63	0,15	0,82	0,05
5	1,63	0,08	0,29	0,02
6	6,30	0,19	2,21	0,13
7	7,10	0,20	2,51	0,14
9	7,90	0,41	6,19	0,45
10	8,78	0,32	2,87	0,15

(continua)

(continuação)				
11	5,77	0,41	1,44	0,14
14	28,83	3,29	76,96	21,48
15	2,54	0,16	3,10	0,20
17	6,07	0,52	13,83	1,62
18	1,00	0,05	1,18	0,06
19	1,45	0,05	0,54	0,03
20	3,29	0,12	2,54	0,14

Na Tabela 10, nota-se que os dados simulados de  $Q_{\text{máx}}$  e LES pelo modelo TOPMODEL apresentaram, em relação aos dados observados, valores subestimados em 71% dos eventos, com uma variação entre os valores de  $Q_{\text{máx}}$  de -82% a 167%, com valor médio de -20%. Os eventos que apresentaram superestimativa são os de maior valor de precipitação total (eventos 14, 15, 17 e 18).

Os resultados foram semelhantes aos encontrados por Ferreira (2004), considerando todos os eventos de validação, sendo que em 75% deles o modelo apresentou subestimação dos valores de vazão máxima de escoamento, resultando numa variação entre os valores de  $Q_{\text{máx}}$  observados e simulados de -400% a 50%, sendo o valor médio de -31%.

Com relação à lâmina de escoamento superficial (LES), o modelo apresentou uma subestimação dos valores em 57% dos eventos. Assim como para a simulação de  $Q_{\text{máx}}$ , os valores de LES que apresentaram superestimativas estão relacionados aos eventos de maior valor de precipitação ( $P_T$ ).

Na Tabela 11 são exibidos os valores dos índices estatísticos obtidos na avaliação do desempenho do modelo ao simular vazões de outro período para o qual não foi calibrado, denominado de fase de teste ou validação.

Tabela 11 - Indicadores de avaliação entre dados simulados e observados de vazão máxima ( $Q_{\text{máx}}$ ) e lâmina de escoamento superficial (LES), pelo modelo TOPMODEL, para os 14 eventos de precipitação no processo de validação.

Variáveis	$Q_{\text{máx}}$	LES
EAM	6,27	1,45
RQME	13,38	4,87
E	-3,04	-35,88

Ao observar os índices estatísticos calculados, nota-se uma discrepância entre os dados observados e simulados, já que os índices apresentaram valores altos para *EAM* e *RQME*, e valores negativos para *E*.

Percebe-se que o modelo possui mais exatidão na simulação da LES, já que os coeficientes calculados se apresentaram melhores que para a  $Q_{\text{máx}}$ . Isso pode ser explicado pelo fato da LES ser obtida a partir da divisão do volume de escoamento superficial pela área total da bacia, enquanto a  $Q_{\text{máx}}$  é um valor pontual do hidrograma, sendo mais difícil de ser estimado com maior precisão. 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 para fazer simulações.

A análise de comparação dos hidrogramas de escoamento superficial observados e simulados no processo de validação são apresentados de forma resumida na Figura 15, o qual apresenta uma comparação gráfica entre as vazões máximas ( $Q_{\text{máx}}$ ) observadas e simuladas, e as lâminas de escoamento (LES) observadas e simuladas pelo TOPMODEL, para os 14 eventos do processo de validação.

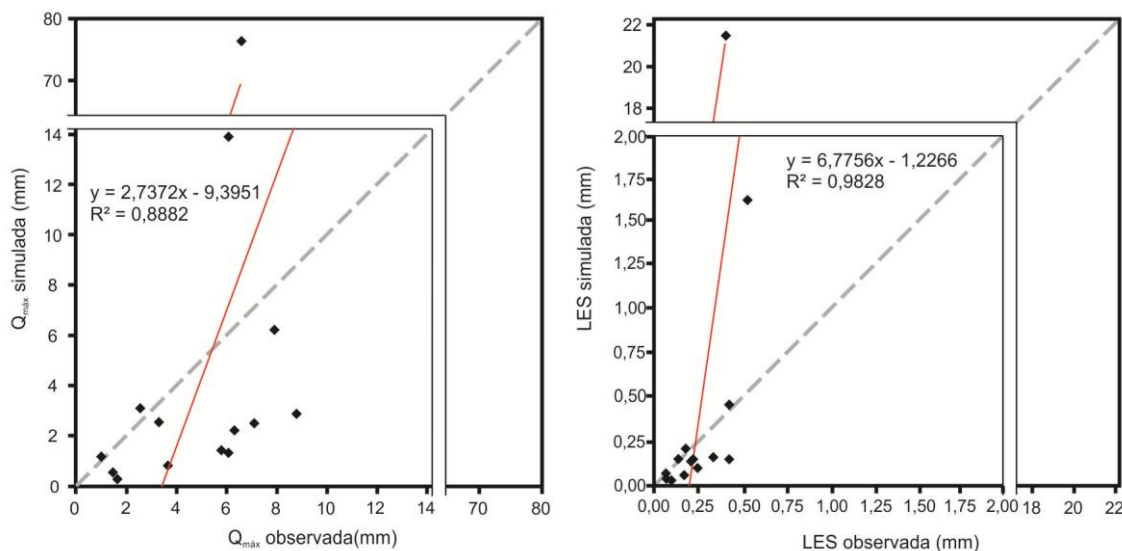


Figura 15 - Ajuste entre as vazões máximas ( $Q_{máx}$ ) e lâminas de escoamento superficial (LES) observadas e simuladas pelo TOPMODEL, para os 14 eventos de precipitação simulados no processo de validação

Ao analisar a Figura 15, pode-se observar que o coeficiente angular da reta (2,7372) indica a tendência de o modelo superestimar os valores de  $Q_{máx}$ , o mesmo ocorrendo com os valores de LES (coeficiente angular de 6,7756). Tal fato deve-se aos altos valores de  $Q_{máx}$  e LES simulados para os eventos 14 e 17.

Os eventos 14 e 17 possuem intensidade máxima de precipitação ( $I_{p máx}$ ) de 182,8mm/h e 142,2mm/h, respectivamente. Esta faixa de intensidade não foi contemplada no processo de calibração, cujo intervalo de  $I_{p máx}$  foi de 30,4 mm/h a 116,8 mm/h. Esta não consideração ocasionou à obtenção de valores discrepantes, no processo de validação, para todas as variáveis ( $Q_{máx}$  e LES) e indicadores de avaliação ( $EAM$ ,  $RQME$  e  $E$ ) em relação aos demais eventos, prejudicando toda a avaliação do modelo.

Ao se excluir estes eventos nota-se uma melhora significativa nos indicadores de avaliação para os 14 eventos de validação, tanto para LES ( $EAM=0,08$ ;  $RQME=0,11$ ;  $E=0,35$ ), quanto para  $Q_{máx}$  ( $EAM=2,52$ ;  $RQME=3,27$ ;  $E=-0,16$ ). Proporcionando também a modificação do coeficiente angular da reta de  $Q_{máx}$ , e LES para 0,3544 e 0,6326, respectivamente, evidenciando o comportamento de subestimativa dos valores, corroborando com os resultados obtidos por Castilho (2005) para  $Q_{máx}$ , e LES e com Mine; Clarke (1996), para valores de  $Q_{máx}$  em todos os eventos de validação.

Na Tabela 12 são apresentados os valores dos índices estatísticos referentes a vazão de escoamento superficial (L/s), simuladas para cada um dos 14 eventos utilizando o modelo TOPMODEL, no qual nota-se uma grande variação destes indicadores. Pode-se constatar que, *EAM* varia entre 0,24 e 28,06 (eventos 19 e 14, respectivamente), *RQME* varia de 0,43 a 36,20 (eventos 15 e 14, respectivamente) e *E* entre -45,34 e 0,81 (eventos 14 e 20, respectivamente). Observa-se, ainda, que 79% dos eventos apresentaram valores positivos de eficiência (*E*), destes, 43% apresentaram coeficiente de eficiência superior a 0,70 (eventos 9, 15 e 20), que de acordo com Mine; Clarke (1996) indicam alta eficiência no ajuste do modelo.

Tabela 12 - Indicadores de avaliação entre dados, simulados pelo TOPMODEL, de vazão de escoamento superficial (L/s), para cada um dos 14 eventos de precipitação no processo de validação.

<b>Evento</b>	<b>EAM</b>	<b>RQME</b>	<b>E</b>
1	0,60	1,30	0,31
3	0,69	1,12	0,03
5	0,34	0,54	-0,08
6	0,50	1,08	0,58
7	0,51	1,15	0,59
9	0,60	1,01	0,79
10	0,80	1,84	0,50
11	1,11	1,78	0,01
14	28,06	36,20	-45,54
15	0,25	0,43	0,73
17	2,09	3,01	-5,13
18	0,26	0,32	0,04
19	0,24	0,38	0,32
20	0,25	0,44	0,81

Estudos realizados por Ranzini (2002) e Ferreira (2004) indicaram que o TOPMODEL apresenta baixos índices de eficiência para eventos isolados com precipitação total ( $P_T$ ) inferior a 20mm. Dentre os eventos selecionados para validação na MCJ, os que apresentaram precipitação menor que 20mm foram os eventos 3, 5, 7 e 19, deste modo, tal indicação foi valida apenas para os eventos 3, 5 e 19, que apresentaram eficiência de 0,03, -0,08 e 0,32, respectivamente,

enquanto o evento 7 apresentou eficiência de 0,59, corroborando os resultados encontrados por Castilho (2005) que obteve melhores valores de eficiência para eventos com valores de  $P_T$  menor que 20mm.

Diante dos 14 hidrogramas resultantes do processo de validação, no qual é possível comparar graficamente o comportamento das vazões simuladas pelo modelo TOPMODEL em relação às vazões observadas, juntamente com os pluviogramas que as geraram, notou-se 4 grupos de comportamento distintos, sendo: Grupo 1 – eventos em que os valores de  $Q_{máx}$  e LES foram subestimados em média em 50%; Grupo 2 – eventos que apresentam simulações com dois picos de  $Q_{máx}$ , em que o modelo subestima o primeiro pico e superestima o segundo pico; Grupo 3 – eventos que apresentaram os melhores valores de eficiência (E) dentre os demais, com a presença de um único pico bem definido; e Grupo 4 – eventos que apresentaram os piores valores de eficiência (E) dentre os demais. As hidrógrafas simuladas para todos os eventos encontram-se no apêndice A.

Na Figura 16 é apresentado o comportamento do hidrograma referente ao evento 07, sendo representativo ao grupo 1 composto pelos eventos 1, 3, 5, 6, 7, 10, 11 e 19.

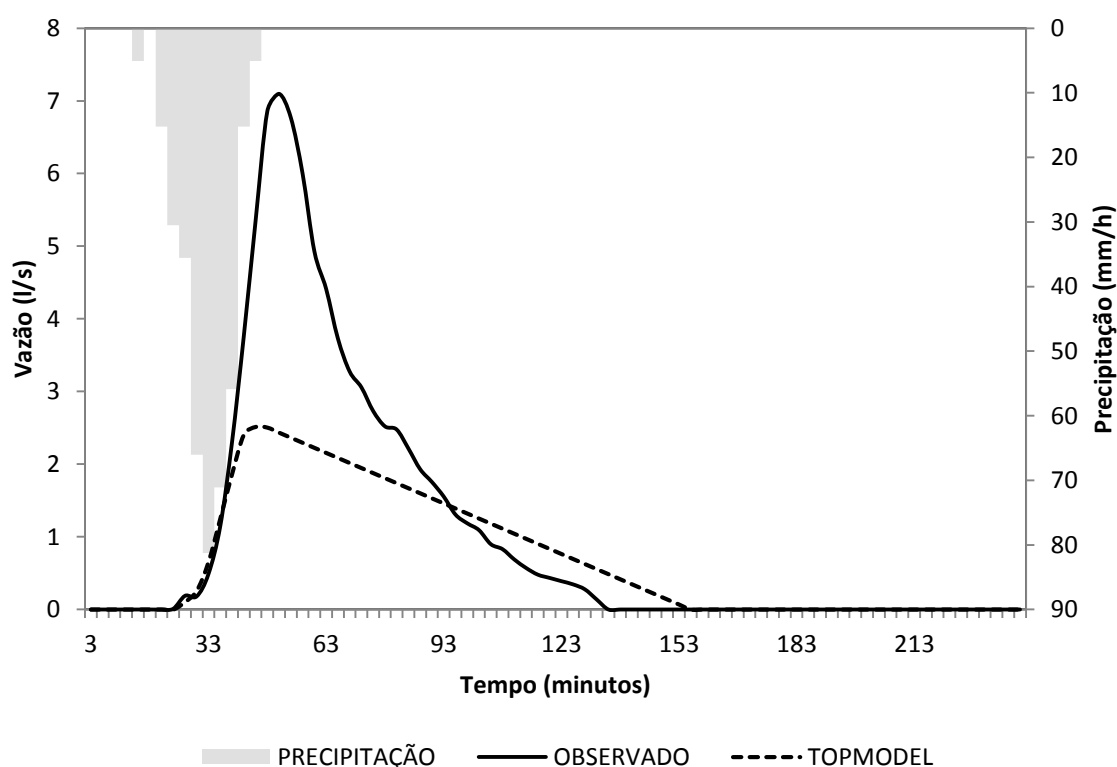


Figura 16 - Vazão observada e simulada no processo de validação, correspondente ao Evento 07 no dia 12/03/2010.

Observou-se que para todos os eventos do grupo, o modelo não conseguiu simular satisfatoriamente a hidrógrafa observada, ocorrendo uma subestimação dos valores de  $Q_{\text{máx}}$  e LES em média de 50%. Outra característica encontrada foi o baixo deslocamento do tempo de pico de  $Q_{\text{máx}}$  em torno de 3 minutos, além de tendência em atrasar o tempo de início do escoamento em cerca de 3 minutos. Este grupo abrange a maior quantidade de eventos, caracterizando-se como tendência das simulações para a MCJ.

Na Figura 17 é apresentado o comportamento do hidrograma referente ao evento 15, sendo representativo ao grupo 2 composto pelos eventos 15 e 18.

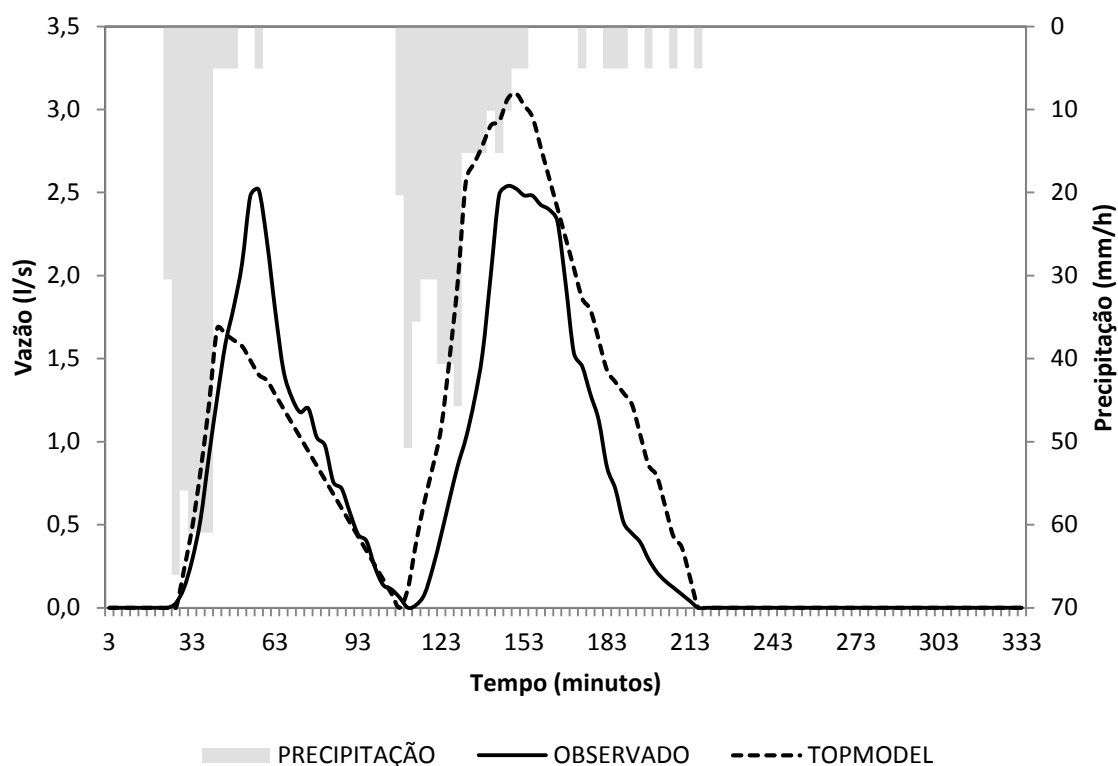


Figura 17 - Vazão observada e simulada no processo de validação, correspondente ao Evento 15 no dia 28/02/2011.

Observou-se que para os dois eventos pertencentes a este grupo, o modelo foi capaz de simular, mantendo a tendência dos comportamentos, os dois picos vazão, de forma que para o valor de  $Q_{\text{máx}}$  no primeiro pico ocorreu uma subestimação em média de 43%. O segundo pico foi superestimado pelo modelo, apresentando uma diferença entre os valores observado e simulado em média de 26%. Para os dois eventos, ocorreu uma tendência em atrasar o início do escoamento superficial em no

máximo 6 minutos, quanto aos tempos de pico de  $Q_{m\acute{a}x}$  ocorreu uma tend\ecencia, do modelo, em adiantar em no m\acaximo 15 minutos. Dentre os dois eventos que apresentaram este tipo de comportamento, o evento 15 se destaca por apresentar alto coeficiente de efici\ecncia (E) no processo de simula\c3o\c3o.

Na Figura 18 \e apresentado o comportamento do hidrograma referente ao evento 20, sendo representativo ao grupo 3 composto pelos eventos 9 e 20.

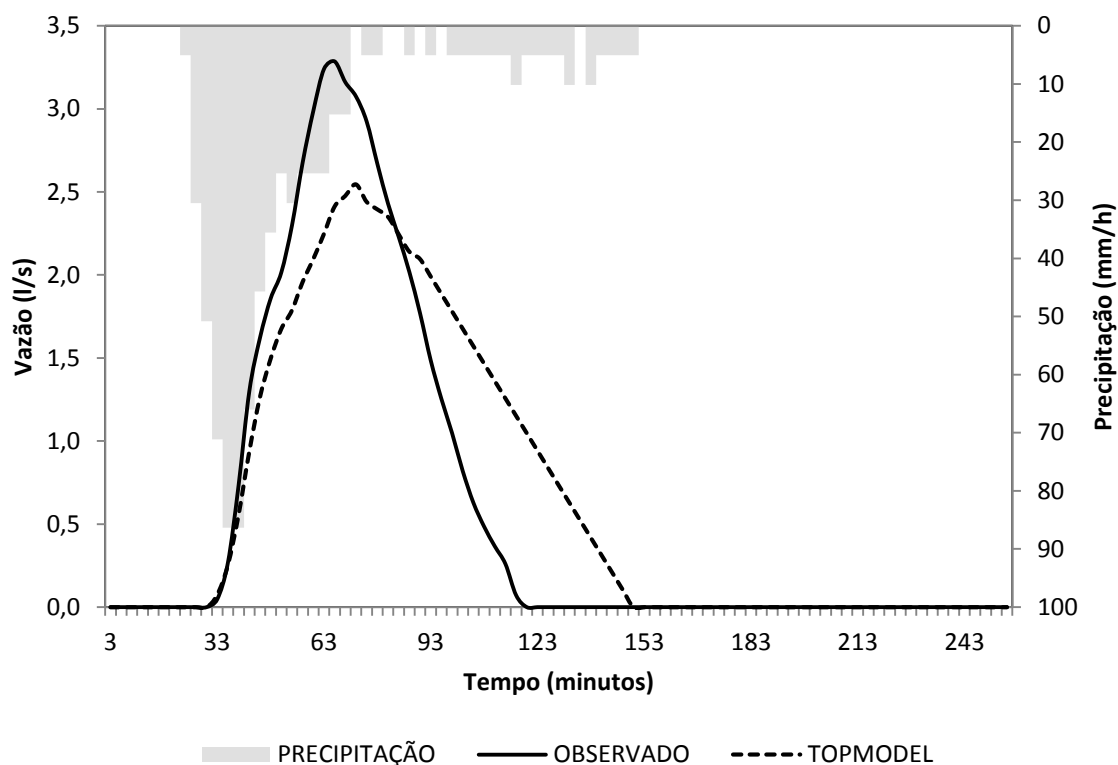


Figura 18 - Vazão observada e simulada no processo de validação, correspondente ao Evento 20 no dia 28/12/2011.

Os dois eventos pertencentes a este grupo, apresentaram os melhores valores de eficiência (E) dentre os demais, com a presença de um único pico de vazão bem definido. Nota-se que os valores observados e simulados estão muito próximos, sendo que os valores de  $Q_{m\acute{a}x}$  observada e simulada apresentaram uma pequena subestimação de 21% em média. O tempo de pico de  $Q_{m\acute{a}x}$  foi adiantado em 15 minutos para o evento 9 e atrasado em 6 minutos para o evento 20. O tempo de início do escoamento superficial simulado não coincidiu com o observado apenas para o evento 9.

Na Figura 19 é apresentado o comportamento do hidrograma referente ao evento 14, sendo representativo ao grupo 4 composto pelos eventos 14 e 17.

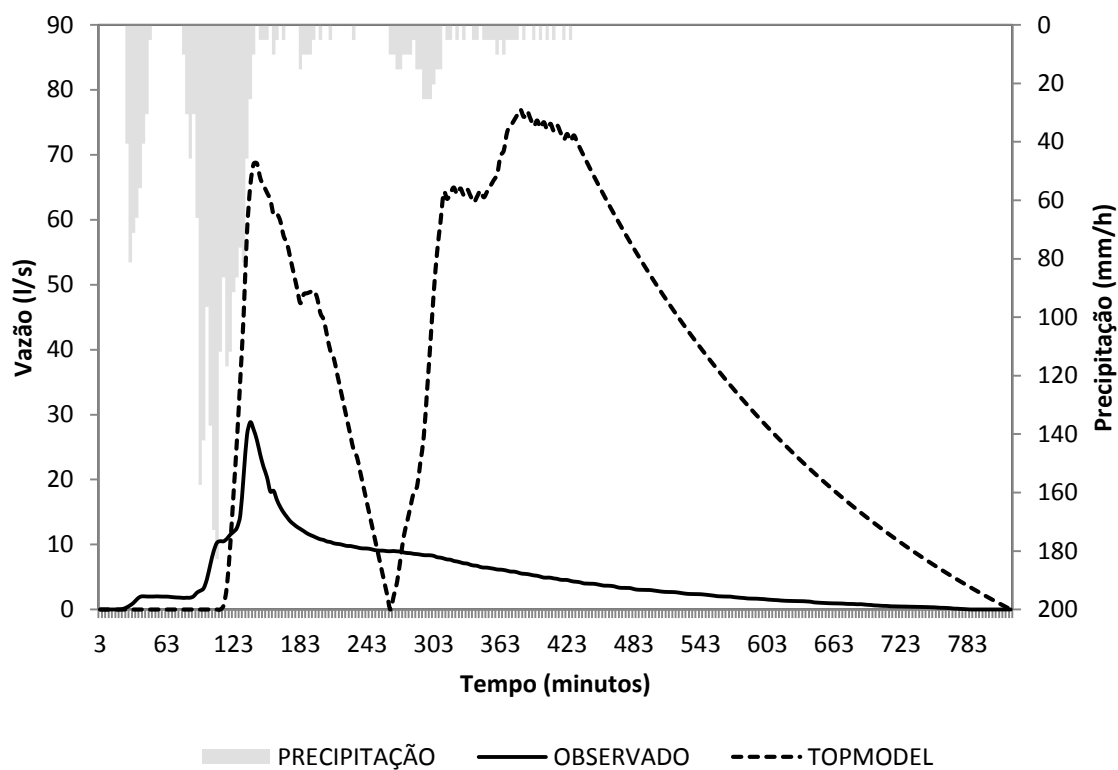


Figura 19 - Vazão observada e simulada no processo de validação, correspondente ao Evento 14 no dia 23/02/2011.

Nota-se que o modelo não simulou satisfatoriamente os valores de vazão, superestimando os valores de  $Q_{m\acute{a}x}$  e LES, sendo o grupo cujos eventos apresentaram os piores coeficientes de eficiência (E), podendo estar relacionado à simulação de dois picos de  $Q_{m\acute{a}x}$  em eventos com um único pico observado, eventos estes cujo principal problema encontrado foi devido a não incorporação da amplitude de intensidade de precipitação durante o processo de calibração.

## 5 CONCLUSÕES

As principais conclusões do presente trabalho, que teve como objetivo avaliar a aplicabilidade do modelo TOPMODEL em simular o comportamento das vazões de escoamento superficial de eventos na microbacia hidrográfica do Córrego Jaqueira (MCJ), localizada no município de Alegre-ES, podem ser assim resumidas:

O modelo TOPMODEL apresenta grande interesse na discussão dos processos geradores de escoamento superficial. Sua configuração, que considera as características físicas da bacia de estudo, necessita de pequena quantidade de parâmetros e oferece a possibilidade de realizar modificações, torna-o atrativo aos estudos hidrológicos.

Pelo grande número de falhas dos dados hidrológicos, não foi possível trabalhar com simulações contínuas, porém a utilização de eventos isolados mostrou-se eficaz, sem perdas consideráveis na qualidade dos resultados das simulações do modelo. Na obtenção dos parâmetros de entrada do modelo, a divisão da microbacia em diferentes tipos de uso do solo foi extremamente importante, visto que diferentes áreas apresentam comportamento hidrológico distinto.

O método utilizado para obtenção dos parâmetros  $m$  e  $\ln(T_0)$  foi satisfatório, visto que os valores encontrados estão dentro da faixa de variação da literatura, entretanto deve-se salientar que o ideal é a obtenção dos parâmetros a partir de medidas a campo, afim de se ter uma melhor representação dos valores reais para a bacia.

A resolução espacial do MNT adotada para obtenção do índice topográfico foi satisfatória, visto que os valores do índice estão coerentes com as características da microbacia.

No processo de calibração, a aplicação do modelo TOPMODEL apresentou um satisfatório desempenho do modelo na simulação de  $Q_{\text{máx}}$  e LES, contudo observou-se uma tendência a subestimar esses valores.

No processo de validação foi observada uma tendência do modelo em subestimar os valores de  $Q_{\text{máx}}$  e LES na maioria dos eventos. A não contemplação no processo de calibração, de toda a amplitude de intensidade de precipitação encontrada para a

MCJ, resultou em valores baixos de eficiência no processo de validação para os eventos que apresentaram alta intensidade de precipitação.

Apesar de apresentar baixa eficiência em diversas simulações dos hidrogramas de vazão de escoamento superficial, o modelo é promissor na modelagem dos hidrogramas, uma vez que os valores de vazão analisados na MCJ são muito pequenos.

## 6 RECOMENDAÇÕES

Com base nos resultados atingidos por este trabalho, podem-se fazer as seguintes recomendações:

Verificar a disponibilidade de informações necessárias, com nível de detalhamento adequado, para que seja garantida a utilização do modelo TOPMODEL de forma satisfatória.

Trabalhar com a bacia de forma mais distribuída possível, dividindo-a em sub-bacias que apresentem maior homogeneidade em termos de cobertura de solo, aprimorando assim os cálculos de evapotranspiração e infiltração e, portanto, do balanço hídrico como um todo, melhorando o ajuste do hidrograma calculado ao observado.

Realizar a determinação, a campo, dos parâmetros  $m$  e  $T_o$ , para os quais o modelo apresenta maior sensibilidade, de modo que se tenha uma melhor representação da área em estudo.

Separar os eventos de precipitação em classes e utilizar os parâmetros calibrados de acordo com a classe de cada evento, de modo a avaliar o desempenho do modelo em relação às diferentes magnitudes de precipitação, levando-se em conta que grupos de eventos distintos apresentaram simulações bem distintas.

Realizar de novos estudos, com a finalidade de avaliar o comportamento hidrológico das áreas hidrologicamente sensíveis (AHS) a partir da estimativa do volume de escoamento superficial gerado diretamente nestas áreas, mediante possíveis cenários de mudanças climáticas e de uso do solo, visando sua utilização no gerenciamento de bacias hidrográficas a partir do entendimento da dinâmica hidrológica local.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAÚJO FILHO, P. F.; CABRAL, J. J. S. P.; ANTONINO, A. C. D.; SAULNIER, G. Modelagem Hidrológica da Bacia do Rio Riacho Gameleira (Pernambuco) utilizando TOPSIMPL, uma Versão Simplificada do Modelo TOPMODEL. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, vol. 10, n. 2, p. 61-72, abr-jun. 2005.
- ARNOLD, J. G.; WILLIAMS, J. R.; SRINIVASAN, R.; KING, K. W.; GRIGGS, R. H. “**SWAT - Soil and Water Assessment Tool**”. USD, Agriculture Research Service, TX 76502. 1994.
- ARNOLD, J.G.; SRINIVASAN, R.; MUTTIAH, R.S.; WILLIAMS, J.R. Large area hydrologic modeling and assessment. Part I: Model development. **J. Am. Water Res. Association**, 34:73-89, 1998.
- AZEVEDO, H. A. M. A.; BARBOSA, R. P. Gestão de Recursos Hídricos no Distrito Federal: uma análise da gestão dos Comitês de Bacias Hidrográficas. **Ateliê Geográfico**, Goiânia, v. 5, n. 13, p.162-182, mar. 2011
- BETSON, R. P. What is watershed runoff? **Journal of Geophysical Research**, v. 69, p. 1541-1551. 1964.
- BEVEN, K. J. Distributed models. In: ANDERSON, M. G. & BURT, T. P. (Ed.) **Hydrological Forecasting**, cap. 13, Willey, Chichester, (1985). p. 405-435.
- BEVEN, K. J. Infiltration into a class of vertically non-uniform soils, **Hydrol. Sci. J.**, 29: 425-432, 1984.
- BEVEN, K. J. **Rainfall-runoff modelling: The primer**. 1 ed. New York: John Wiley&Sons. 2001.
- BEVEN, K. J. TOPMODEL: a critique. **Hydrological Processes**, v. 11, p. 1069-1085. 1997.
- BEVEN, K. J.; KIRKBY, M. J. A physically based variable contributing area model of basin hydrology. **Hydrologic Science Bulletin**, v. 24, n. 1, p. 43-69. 1979.
- BEVEN, K. J.; KIRKBY, M. J.; SCHOFIELD, N.; TAGG, A. F. Testing a Physically-based flood forecasting model (Topmodel) for three U.K. catchments. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 69, p. 119–143. 1984.
- BEVEN, K. J.; LAMB, R.; QUINN, P.F.; ROMANOWICZ, R.; FREER, J. “TOPMODEL”. In: SINGH, V.P. (Ed.). **Computer models of watershed hydrology**. Water Resources Publishers, Colorado, USA, 1995. p. 627-668.
- BEVEN, K.; FREER, J. A dynamic TOPMODEL. **Hydrological Processes**, v.15, p. 1993- 2011. 2001.
- BLÖSCHL, G. Scaling in hydrology. **Hydrological Processes**, v. 15, p. 709-711. 2001.

BONELL, M., MCDONNELL, J.J., SCATENA, F., SEIBERT, J., UHLENBROOK, S., VAN LANEN, H. HELPing FRIENDs in PUBs: charting a course for synergies within international water research programs in gauged and ungauged basins. **Hydrological Processes**, v. 20, p. 1867–1874. 2006.

BRANDÃO, V. S.; CECÍLIO, R. A.; PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D. **Infiltração da água no solo**. 3. ed. Viçosa, MG: UFV, 2006. 120 p.

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. **Revista de la Universidad del Azuay**, n. 31-32, ago/dez. p.149-157, 2003.

CAMARGO, A. P.; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 5, p.89-97, 1997.

CAMPLING, P.; GOBIN, A.; BEVEN, K. J.; FEYEN, J. Rainfallrunoff modelling of a humid tropical catchment: The TOPMODEL approach. **Hydrological Processes**, Chichester, v. 16, p. 231–253. 2002.

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

CASTILHO, C. P. G. **Simulação hidrológica de uma bacia rural utilizando o modelo TOPMODEL acoplado a um modelo de interceptação de chuva pela cobertura vegetal**. 2005. 280 f. Tese (Doutorado em Engenharia) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, 2005.

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

CECÍLIO, R. A. **Modelagem da infiltração da água no solo fundamentada na equação de Green-Ampt-Mein-Larson**. 2005. 151p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2005.

CECÍLIO, R. A.; MARTINEZ, M. A.; PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D.; ATAÍDE, W. F. Substituição dos parâmetros do modelo de Green-Ampt-Mein-Larson para estimativa da infiltração em alguns solos do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, n. 5, p. 1141-1151, 2007.

CHONG, S. K.; GREEN, R. E.; AHUJA, L. R. Infiltration prediction based on estimation of Green-Ampt wetting front pressure head from measurements of soil water redistribution. **Soil Science Society of America Journal**, v.46, p.235-239, 1982.

CHRISTOFOLETTI, A. **Modelagem de sistemas ambientais**. 1ª ed., São Paulo: Edgard Blücher. 1999. 236p.

CLARKE, R. T. "A review of some mathematical models used in hydrology, with observations on their calibration and use". **Journal of Hydrology**, v. 19, n. 1, p. 1-20, 1973.

CLARKE, R.T. A review of some mathematical models used in hydrology, with observations on their calibration and use". **Journal of Hydrology**, v. 19, n. 1, p. 1-20, 1973.

COELHO, F. S. A. **Desenvolvimento de um modelo chuva-deflúvio, para pequenas bacias rurais, a partir dos modelos do Hidrograma Unitário Instantâneo Geomorfológico e do TOPMODEL**. 2003. 192 f. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Campinas, São Paulo, 2003.

COLLISCHONN, W. **Simulação hidrológica de grandes bacias**. 2001. 270 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, 2001.

CRAWFORD, N. H. E LINSLEY, R. K. **Digital simulation in hydrology: Stanford Watershed Model IV**. Technical Report 39. Palo Alto, CA: Department of Civil Engineering, Stanford University. 1966. 210 p.

DOOGE, J. C. I. **Linear theory of hydrologic systems**. Technical Bulletin, n. 1468. Agricultural Research Service, US Department of Agriculture, Washington DC, 1973. 327 p.

DUNNE, T.; BLACK, R. D. Partial-area contributions to storm runoff in a small New England watershed. **Water Resources Research**, Washington, v. 6, p. 1296-1311. 1970.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisas de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro, 1999. 412p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento de Instrumentação Agropecuária. **Análise granulométrica por raios gama**. São Carlos – SP, 1997. 13p.

FAYAL, M. A. A. **Previsão de vazão por redes neurais artificiais e transformada Wavelet**. 2008. 158 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.

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

- FLANAGAN, D.C. & NEARING, M.A. **Water erosion prediction project: Technical Documentation**. West Lafayette, USDA-ARS-NSERL, 1995 (NSERL Report, 10)
- FRANCHINI, M.; WENDLING, J.; OBLED, C.; TODINI, E. Physical interpretation and sensitivity analysis of the TOPMODEL. **Journal of Hydrology**, v.175, p.293 - 338, 1996.
- FUKUNAGA, D. C. **Estimação de vazão em bacias hidrográficas do sul do Espírito Santo usando o SWAT**. 2012. 98 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais). Alegre, Universidade Federal do Espírito Santo, 2012.
- GALVÃO, C. O. **Aplicabilidade em recursos hídricos da previsão de precipitação de longo prazo no Nordeste do Brasil**. 1999. 151 f. Tese (Doutorado) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 1999.
- GONÇALVES, R. C. **Modelagem Hidrológica do tipo chuva-vazão via SMAP e TOPMODEL - Estudo de Caso: Bacia do Rio Piabanha – RJ**. 2008. 173 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Programa de Engenharia Civil, Rio de Janeiro, 2008.
- GUARIZ, H. R. **Morfometria e Atributos Físicos do Solo da Microbacia do Córrego Jaqueira – Alegre, ES**. 2008. 128 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, ES, 2008.
- GUMINDOGA, W.; RWASOKA, D. T.; MURWIRA, A. Simulation of streamflow using TOPMODEL in the Upper Save River catchment of Zimbabwe. **Physics and Chemistry of the Earth**. Parts A/B/C, v. 36, Issues 14–15, p. 806 – 813, 2011
- GUPTA, S. K.; SOLOMON, S. I. “Distributed numerical model for estimating runoff and sediment discharge of ungaged rivers. 1. The information system”. **Water Resources Research**, v. 13, n. 3, p. 613-618, 1977.
- HEWLETT, D.; HIBBERT, A. R. Factors affecting the response of small watersheds to precipitation in humid areas. *In*: SOPPER, W. E.; LULL, H. W. **Forest Hydrology**. Oxford: Pergamon Press, 1967. p. 275-290.
- HORTON, R. E. The role of infiltration on the hydrologic cycle. **Transactions of American Geophysical Union**, v. 145, p. 446-460. 1933.
- IBBITT, R. P.; O'DONNELL, T. “Fitting methods for conceptual catchment models”. **Journal of Hydraulics Division**, American Society of Civil Engineering, v. 97, n. 9, p. 1331–1342, 1971.
- IORGULESCU, I.; JORDAN, J. P. “Validation of TOPMODEL on a small Swiss catchment”, **Journal of Hydrology**, 159, pp 255-273, 1994.
- JOHNSTON, P. R.; PILGRIM, D. “Parameter optimization for watershed models”. **Water Resources Research**, v. 12, p. 477–486, 1976.

KRAUSKOPF NETO, R. **Atualização de modelos chuva-vazão-propagação com estimadores de estado**. 2005. 260f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

LEGATES, D. R.; MCCABE JR., G. J. Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. **Water Resources Research**, v.35, n.1, p. 233-241, 1999.

LIANG ET AL., X. LIANG, D.P. LETTENMAIER, E.F. WOOD, S.J. BURGESS. A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. **J. Geophys. Res.**, 99 (D7) (1994), pp. 14,415-14,428, 1994

LIMA, J. E. F. W. **Modelagem numérica do fluxo da água no solo e do escoamento de base em uma bacia experimental em área agrícola no Cerrado**. 2010. 312 f. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, 2010.

LIMA, J. S. S.; SILVA, S. A.; OLIVEIRA, R. B.; CECÍLIO, R. A.; XAVIER, A. C. Variabilidade temporal da precipitação mensal em Alegre – ES. **Rev. Ciênc. Agron.**, Fortaleza, v. 39, n. 02, p. 327 -332, 2008.

LIMA, L. S. **Implementação de um modelo hidrológico distribuído na plataforma de modelagem Dinamica EGO**. 2011. 95 f. Dissertação (Mestrado) - Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, 2011.

LOU, A.P.F. **Modelagem Geoestatística Aplicada a Integração entre Dados de Postos Pluviométricos e Radar Meteorológico**. 2004. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2004.

LOU, R. F. **Modelagem Hidrológica Chuva-vazão e Hidrodinâmica Aplicada na Bacia Experimental do Rio Piabanha-RJ**. 2010. 174 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2010.

MACHADO, M. L. **Modelagem Hidrológica de Fluxo na Bacia Representativa de Juatuba**. 2000. 240 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. 2000.

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

MEIN, R. G.; LARSON, C. L. Modeling infiltration during a steady rain. **Water Resources Research**, v. 9, n. 2, p. 384-394, 1973.

MESQUITA, M. G. B. F.; MORAES, S. O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. **Ciência Rural**, v. 34, n. 3, p. 963-969, 2004.

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

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

MOTA, J. L. O. Modelos matemáticos y su aplicación al manejo de cuencas hidrográficas. In: IX CONGRESO NACIONAL DE IRRIGACIÓN, 1999, Culiacán, Sinaloa, México. **Anais...** Culiacán, Sinaloa, México, 1999.

NASH, J. E.; SUTCLIFFE, J. V. River flow forecasting through conceptual models, I, A discussion of principles. **Journal of Hydrology**, v.10, p. 282-290, 1970.

NOBREGA, R. S. **Modelagem de Impactos do Desmatamento nos Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Jamari (Ro) Utilizando Dados de Superfície e do Trmm**. 2008. 188 f. Tese (Doutorado) - Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB. 2008.

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

PRUSKI, F. F., BRANDÃO, V. S., SILVA, D. D. **Escoamento superficial**. Viçosa: UFV, 2003. 88 p.

QUINN, P. F. BEVEN, K. CHEVALLIER, P. and PLANCHON, O. The Prediction of Hillslope Flow Paths for Distributed Hydrological Modelling Using Digital Terrain Models, **Hydrological Process**, v. 5, p. 59-79. 1991.

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

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

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

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

REFSGAARD, J. C. "Terminology, modeling protocol and classification of hydrological model codes". In: REFSGAARD, J. C.; BBOTT, M. B. (ed.). **Distributed hydrological modeling**, 1996. p. 17-40.

RENNO, C. D.; SOARES, J. V. **Modelos hidrológicos para a gestão ambiental. Programa de ciência e tecnologia para gestão de ecossistemas – "Ação, métodos, modelos e geoinformação para a gestão ambiental"**. Ministério da Ciência e Tecnologia. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Relatório técnico parcial, 2000.

RENNÓ, C. D.; SOARES, J. V. Uso do Índice Topográfico como Estimador da Profundidade do Lençol Freático. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 11. 2003, Belo Horizonte. **Anais XI SBSR**, Brasil, INPE, 2003.p. 2579 - 2588.

ROCKWOOD, D.M. Columbia basin streamflow routing by computer. **Journal of waters and harbors division**, American Society of Civil Engineers, v. 84, n. 5, p. 1-15. 1958.

RODRIGUES, L. N. **Modelo para dimensionamento e para simulação do desempenho de pivô central**. 1999. 145p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1999.

SANTOS, I. **Modelagem geobiohidrológica como ferramenta no planejamento ambiental: estudo da bacia do rio Pequeno, São José dos Pinhais - PR**. 2001. 93 f. Dissertação (Mestrado em Ciências do Solo) - Curso de Pós-graduação em Agronomia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2001.

SANTOS, I. **Monitoramento e modelagem de processos hidrogeomorfológicos: mecanismos de geração de escoamento e conectividade hidrológica**. 2009. 83 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Centro de Geografia e Ciências Humanas, Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, 2009.

SANTOS, I.; KOBAYAMA, M. Aplicação do TOPMODEL para determinação de áreas saturadas da bacia do rio Pequeno, São José dos Pinhais, PR, Brasil. **Ambi-Agua**, v. 3, n. 2, p. 77-89. 2008.

SANTOS, L. L. MODELOS HIDRÁULICOS-HIDROLÓGICOS: Conceitos e Aplicações. **Revista Brasileira de Geografia Física**, Recife-PE, v. 2, n. 3, p. 01-19. set-dez, 2009.

SANTOS, L. N. S. **Modelagem hidrológica em microbacia do sul do Espírito Santo: teste do modelo HidroBacia**. 2010. 103 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal). Alegre, Universidade Federal do Espírito Santo, 2010.

SAULNIER, G. M. **Information pedologique spatialisee et traitements topographiques ameliores dans la modelisation hidrologique par TOPMODEL**. 1996. 340p. (Tese de Doutorado) Institut National Polytechnique de Grenoble, Grenoble, 1996.

SCHULER, A. **Aplicação do TOPMODEL em uma bacia de mesoescala localizada na cabeceira do Rio Corumbataí**. São Carlos. 1998. 130 f. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 1998.

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

SHERMAN, L. K. Stream Flow from Rainfall by the Unit-Graph Method. **Engineering News Record.**, v. 108, p. 501-505. 1932.

SIEFERT, C. A. C. **Delimitação de áreas hidrologicamente sensíveis por meio de modelagem de processos e da relação solo-vegetação em ambientes hidromórficos**. 2012. 111 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2012.

SIEFERT, C. A. C.; DOS SANTOS, I. Áreas hidrologicamente sensíveis: teoria e aplicação para a bacia do rio Barigui, PR, Brasil. **Ambi-Água**, v. 5, n. 2, p.61-76, 2010.

SILVA, J. M. A. **Modelo hidrológico para o cálculo do balanço hídrico e obtenção do hidrograma de escoamento superficial em bacias hidrográficas: desenvolvimento e aplicação**. 2002. 142p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa – UFV, Viçosa, MG, 2002.

SILVA, R. V.; KOBIYAMA, M. Estudo Comparativo de Três Formulações do TOPMODEL na Bacia do Rio Pequeno, São José dos Pinhais, PR. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 12, n. 2, abr/jun, p. 93–105, 2007.

SILVA, R. V.; KOBIYAMA, M. TOPMODEL: teoria integrada e revisão. **Revista RA´E GA**, Curitiba, Editora UFPR. n. 14, p. 97-110, 2007.

SILVA, R.V. **Análise comparativa de três formulações do TOPMODEL na bacia do Rio Pequeno - PR**. 2005. 128 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

SINGH, V.P. (Ed.). **Computer models of watershed hydrology**. Water Resources Publications, Colorado: Highlands Ranch, 1995. 1130 p.

SIVAPALAN, M. Process complexity at hillslope scale, process simplicity at the watershed scale: is there a connection?. **Hydrological Processes**, v. 17, p. 1037–1041. 2003.

SIVAPALAN, M., TAKEUCHI, K., FRANKS, S. W., GUPTA, V. K., KARAMBIRI, H., LAKSHMI, V., LIANG, X., MCDONNELL, J. J., MENDIONDO, E. M., O'CONNELL, P. E., OKI, T., POMEROY, J. W., SCHERTZER, D., UHLENBROOK, S. E ZEHE, E. IHS decade on Predictions in Ungauged Basins (PUB), 2003–2012: shaping an exciting future for the hydrological sciences. **Hydrological Sciences Journal**, v. 48, p. 857–880. 2003.

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

SOIL CONSERVATION SERVICE. **National engineering handbook**. s.l., 1972. n.p. (Section 4: Hydrology).

SOULSBY, C.; TETZLAFF, D., DUNN, S. M.; WALDRON S. Scaling up and out in runoff process understanding: insights from nested experimental catchment studies. **Hydrological Processes**, v. 20, p. 2461–2465. 2006.

STEPHENSON, G. R.; FREEZE, R. “Mathematical simulation of subsurface flow contributions to snowmelt runoff, Reynolds Creek Watershed, Idaho”. **Water Resources Research**, v. 10, n. 2, p. 284-293, 1974.

TUCCI, C. E. M. (Org.) Hidrologia: ciência e aplicação. 4 ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS: ABRH: EDUSP, 2007. 943p.

TUCCI, C. E. M. **Modelos hidrológicos**. 2ª ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, ABRH, 2005. 678 p.

VARELLA, R. F., CAMPANA, N. A. Simulação matemática do processo de transformação de chuva em vazão: estudo do modelo TOPMODEL. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 5, n. 4, out/dez, p. 121–139. 2000.

VISSMAN, W.; LEWIS, G. L. **Introduction to hydrology**. 5ª ed. New York: Prentice Hall, 2002. 624 p.

WANG, X.; LIU, T.; LI, C.; ZHU, Z.; ZHANG, S.; MELESSE, A. M. Development of a modified rational equation for arid region runoff estimation. In: WORLD ENVIRONMENTAL AND WATER RESOURCES CONGRESS: BEARING KNOWLEDGE FOR SUSTAINABILITY, 2011, Palm Springs. **Anais...California: American Society of Civil Engineers**, 2011. p. 4702-4716.

WIGMOSTA, M. S.; VAIL, L. W.; LETTENMAIER, D. P.; A distributed hydrology–vegetation model for complex terrain. **Water Resources Research** 30: 1665–1679, 1994.

WILLMOTT, C. J. On the validation of models. **Physical Geography**, v.2, p. 184-194, 1981.

WILSON, B. N.; ODURO, P. Analytical sensitivity coefficients for the GAML infiltration model. **Transactions of the ASAE**, v. 47, n. 2, p. 479-484, 2004.

WOOLHISER, D. A.; SMITH, R. E.; SHARIF, H. O.; GOODRICH, D. C. **KINEROS, a kinematic runoff and erosion model**. Documentation and user manual. ARS-77, U.S. Dept. of Agriculture, Agricultural Research Service. 1990. 130 p.

WOOLHISER, D.A.; SMITH, R.E.; GOODRICH, D.C. KINEROS, A kinematic runoff and erosion model: documentation and user manual. USDA-Agricultural **Research Service**, ARS-77, pp 130. 1990.

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

XAVIER, L. N. R., ROTUNNO FILLHO, 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.

XAVIER, M. C. R. **Estudo da Distribuição Espacial de Vazões na Gestão dos Recursos Hídricos**. 2007. 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental - Área de Concentração: Gestão de Recursos Hídricos) - Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ, Rio de Janeiro, 2007

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

## APÊNDICE

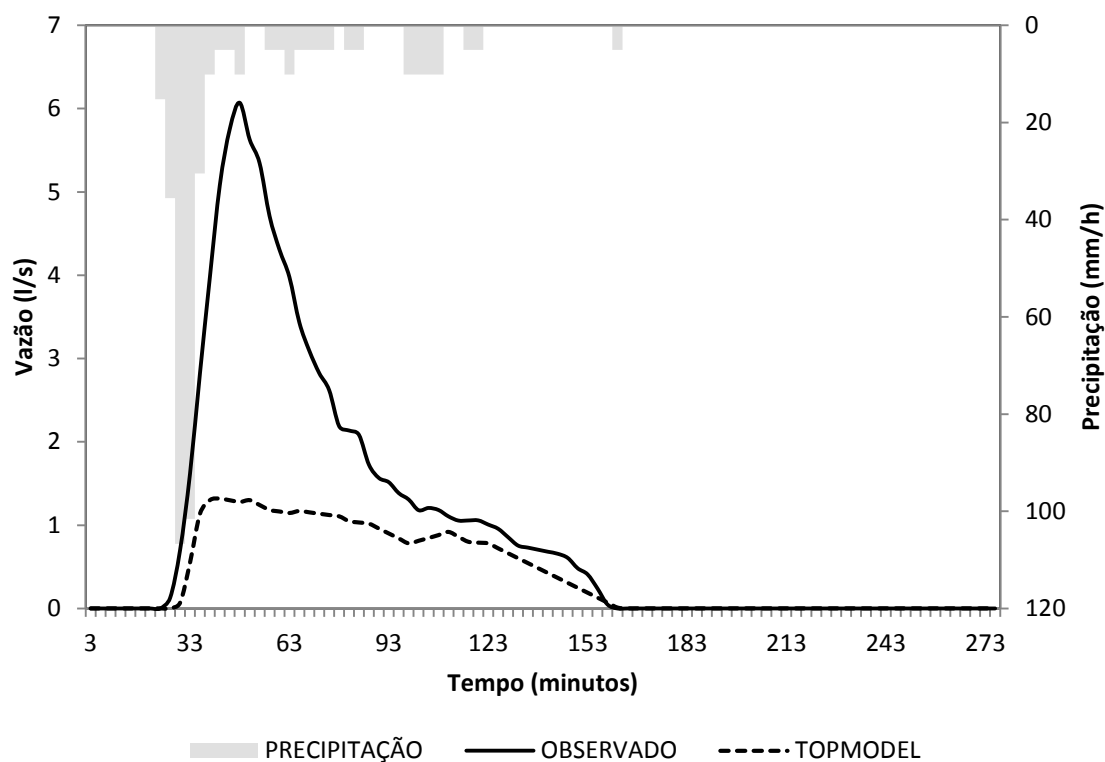


Figura 20A - Vazão observada e simulada no processo de validação, correspondente ao Evento 01 no dia 19/07/2009.

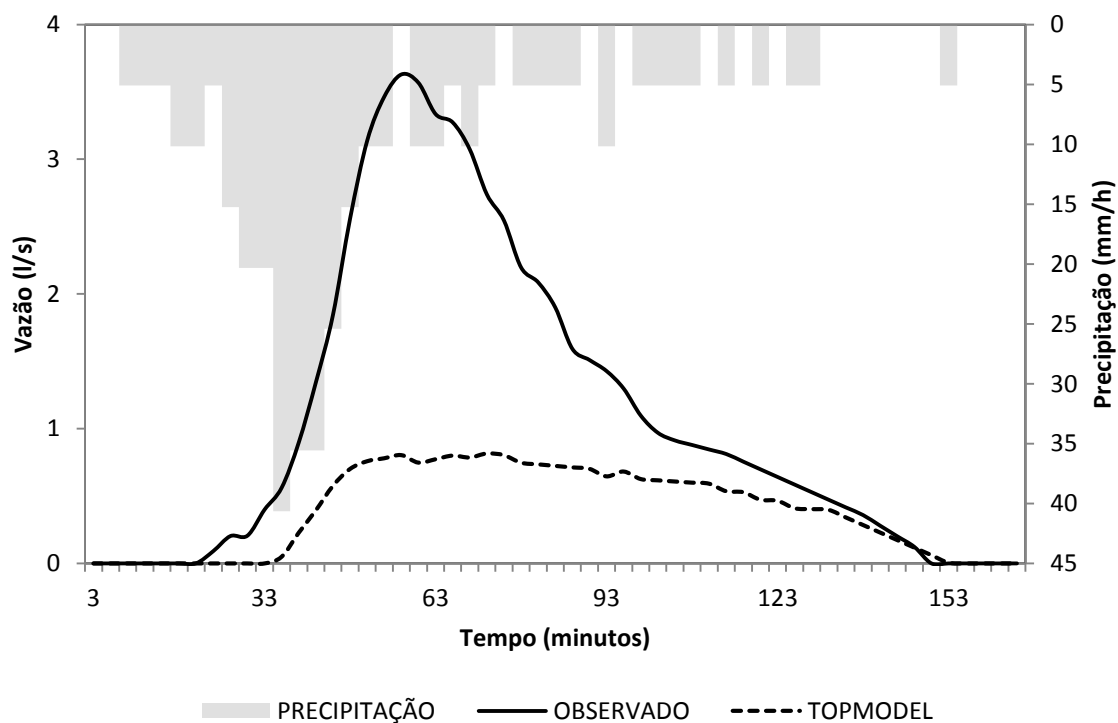


Figura 21A - Vazão observada e simulada no processo de validação, correspondente ao Evento 03 no dia 14/12/2009.

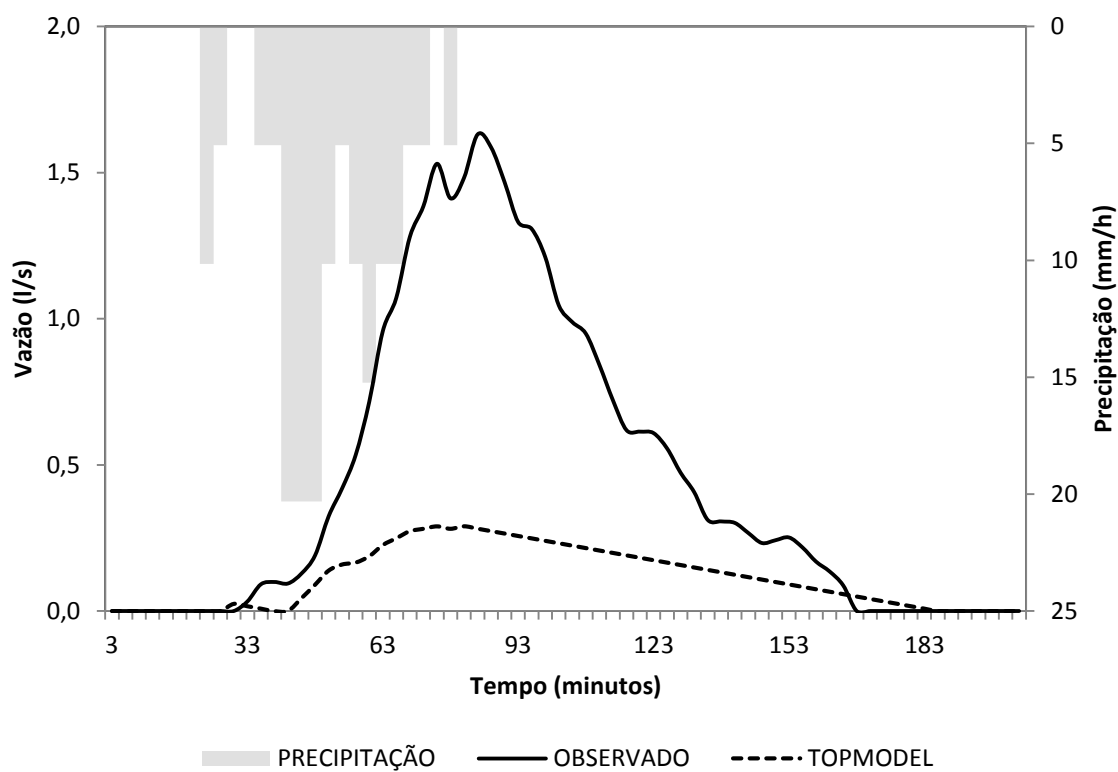


Figura 22A - Vazão observada e simulada no processo de validação, correspondente ao Evento 05 no dia 11/03/2010.

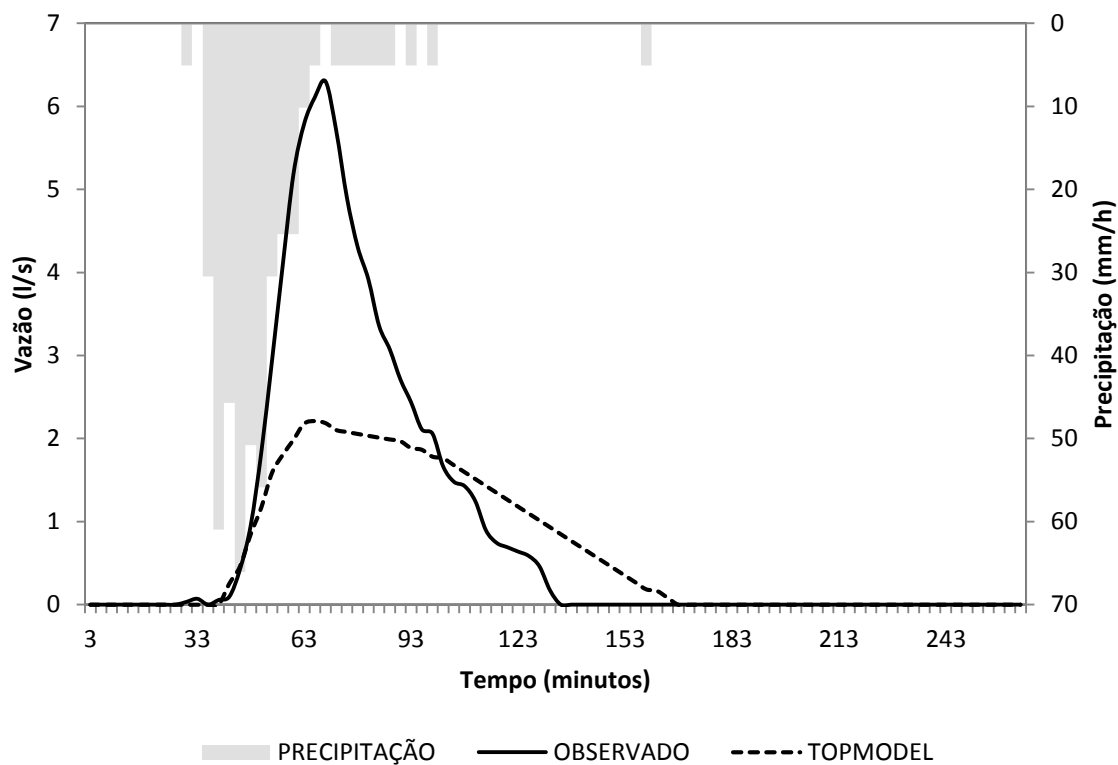


Figura 23A - Vazão observada e simulada no processo de validação, correspondente ao Evento 06 no dia 12/03/2010.

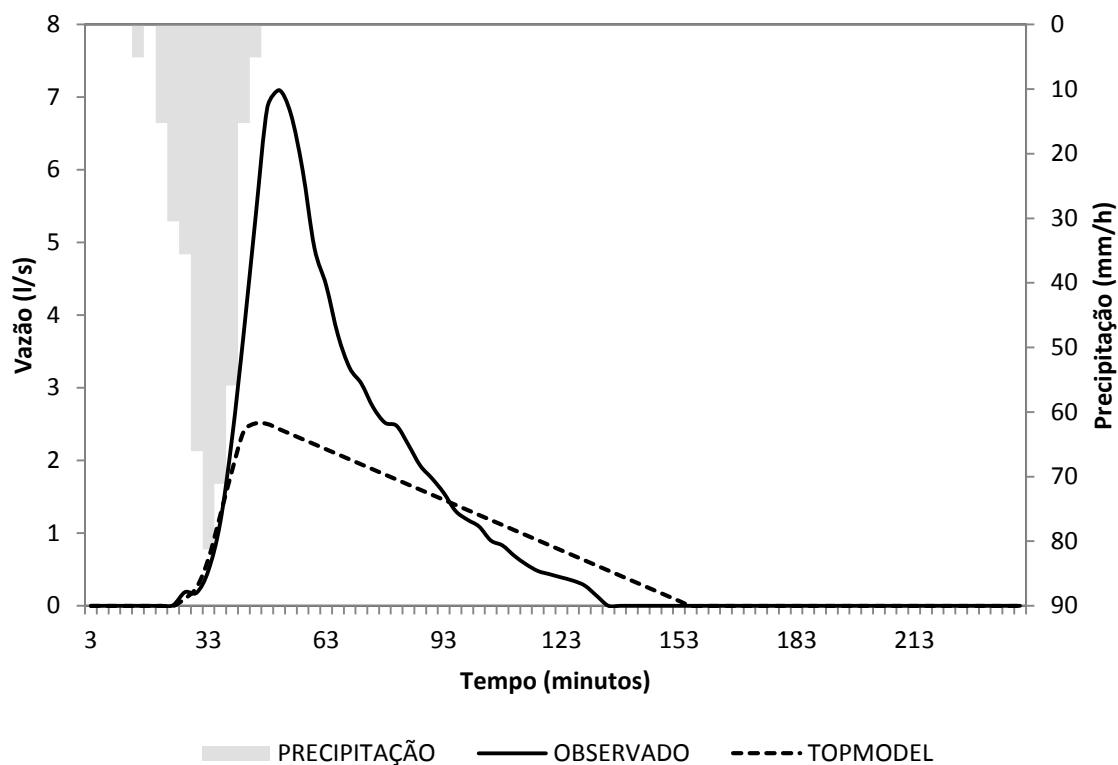


Figura 24A - Vazão observada e simulada no processo de validação, correspondente ao Evento 07 no dia 12/03/2010.

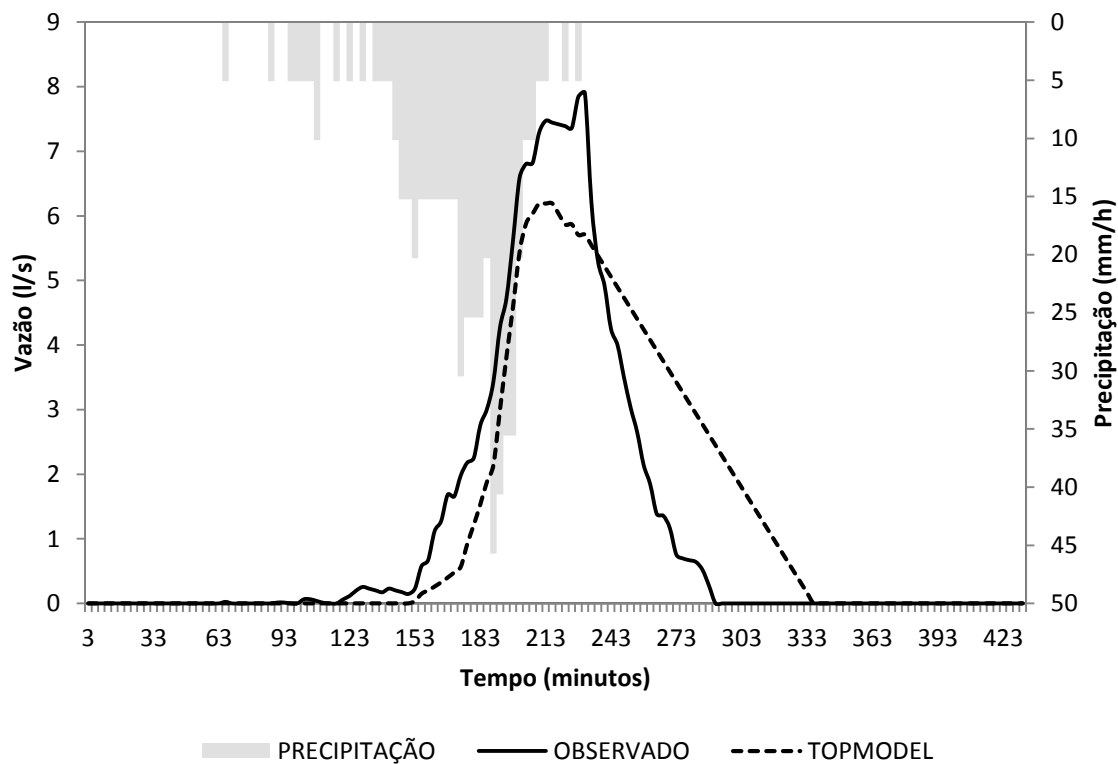


Figura 25A - Vazão observada e simulada no processo de validação, correspondente ao Evento 09 no dia 07/11/2010.

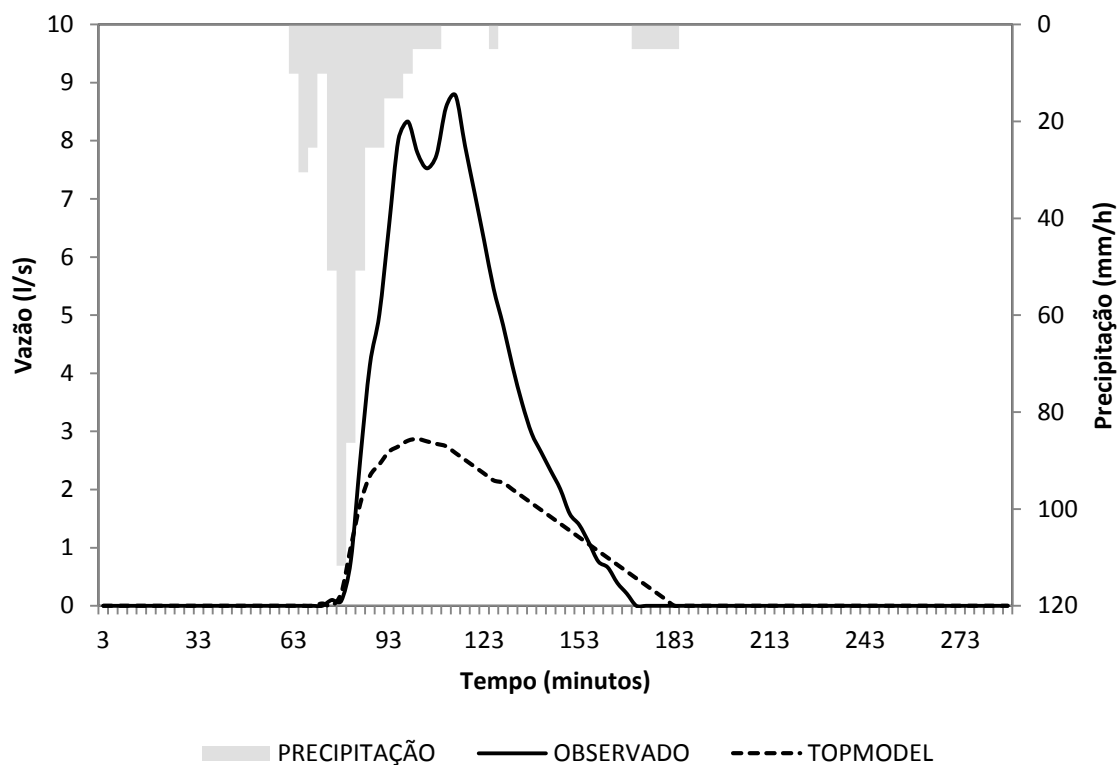


Figura 26A - Vazão observada e simulada no processo de validação, correspondente ao Evento 10 no dia 23/11/2010.

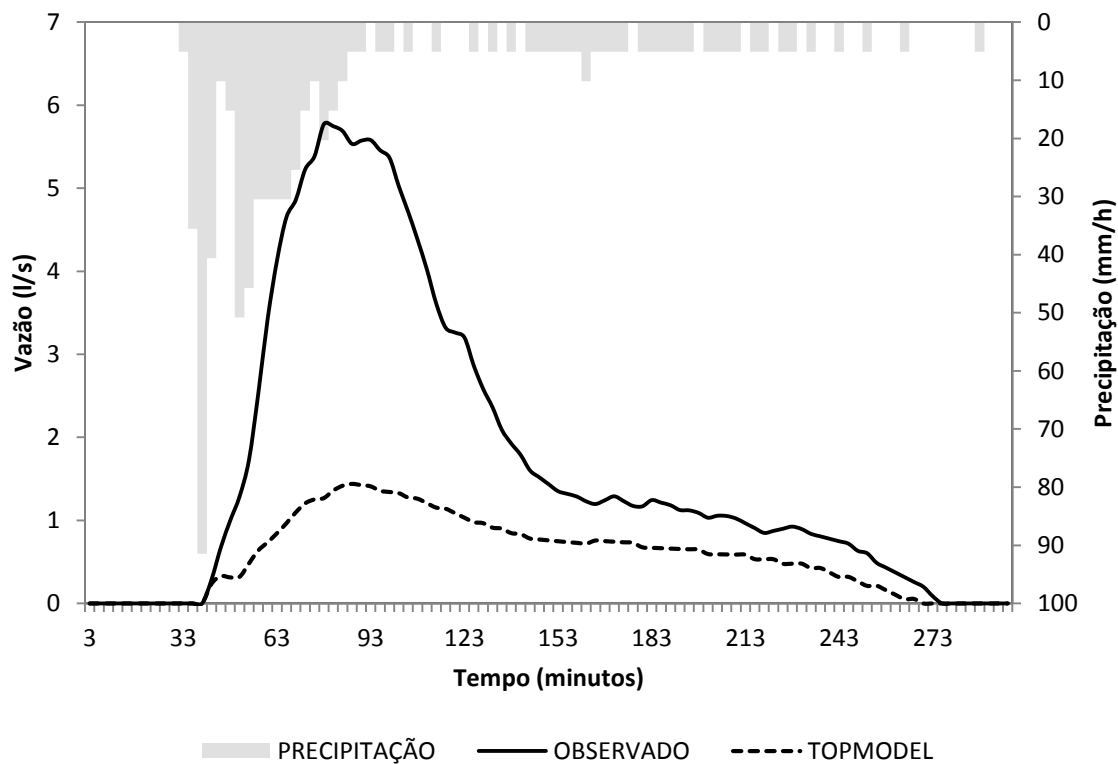


Figura 27A - Vazão observada e simulada no processo de validação, correspondente ao Evento 11 no dia 03/12/2010.

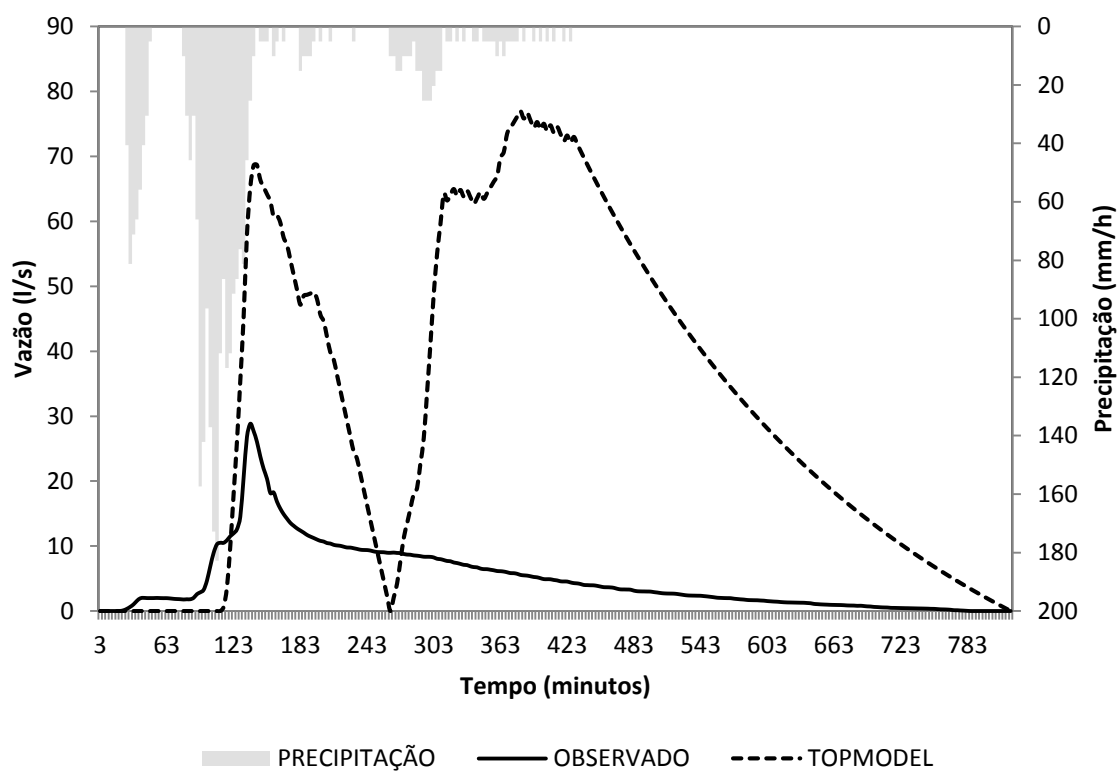


Figura 28A - Vazão observada e simulada no processo de validação, correspondente ao Evento 14 no dia 23/02/2011.

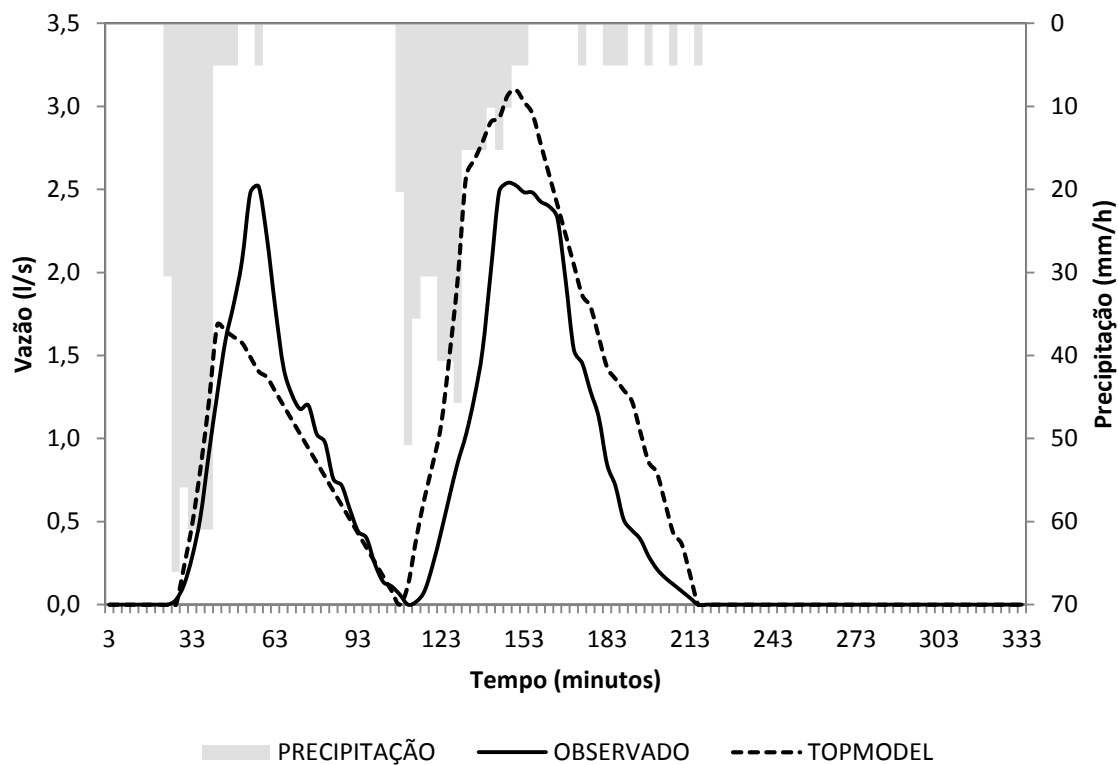


Figura 29A - Vazão observada e simulada no processo de validação, correspondente ao Evento 15 no dia 28/02/2011.

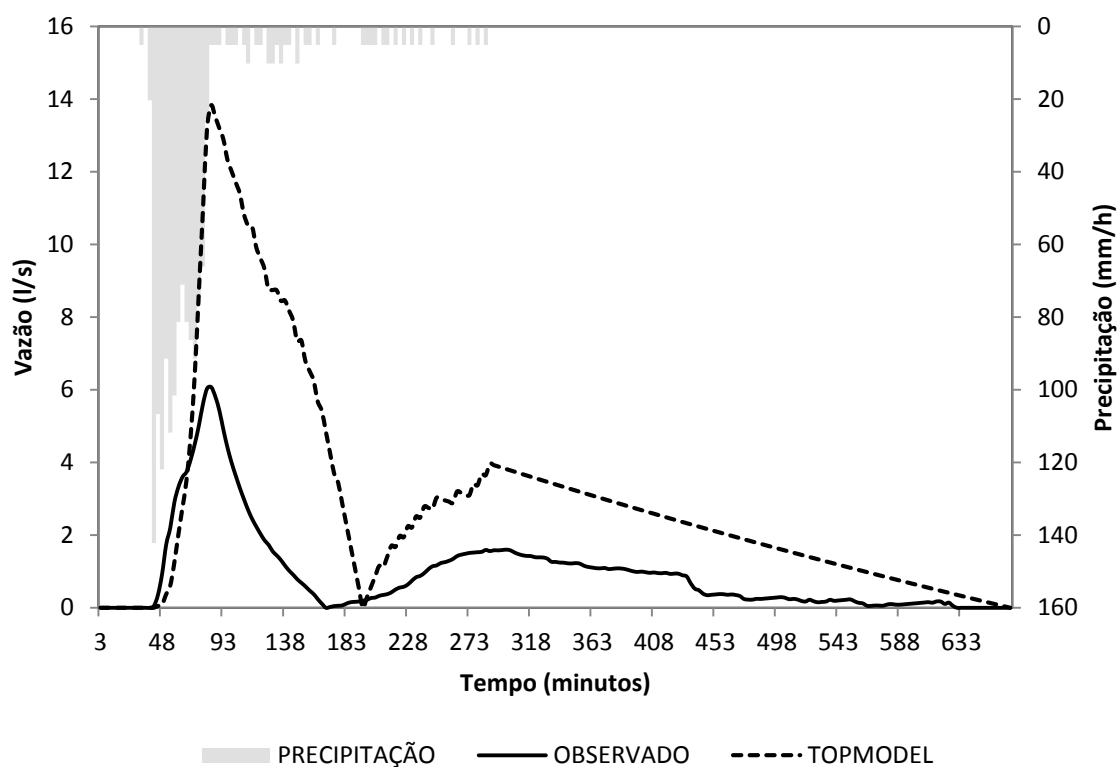


Figura 30A - Vazão observada e simulada no processo de validação, correspondente ao Evento 17 no dia 17/10/2011.

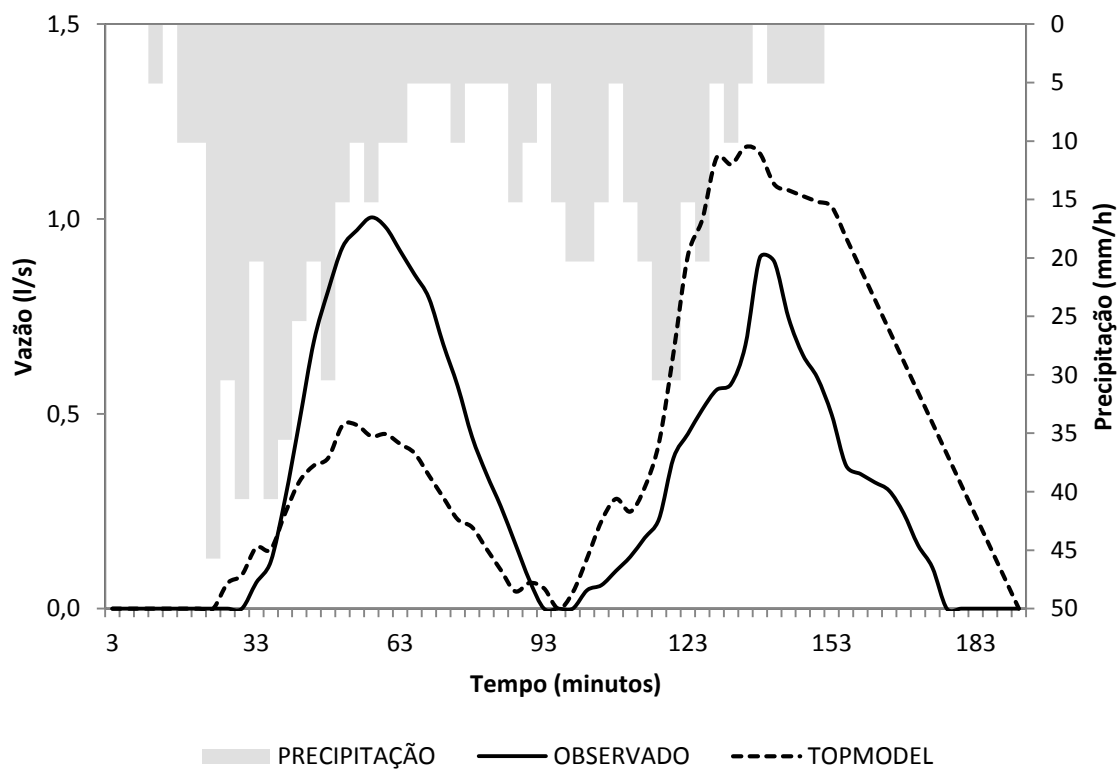


Figura 31A - Vazão observada e simulada no processo de validação, correspondente ao Evento 18 no dia 15/11/2011.

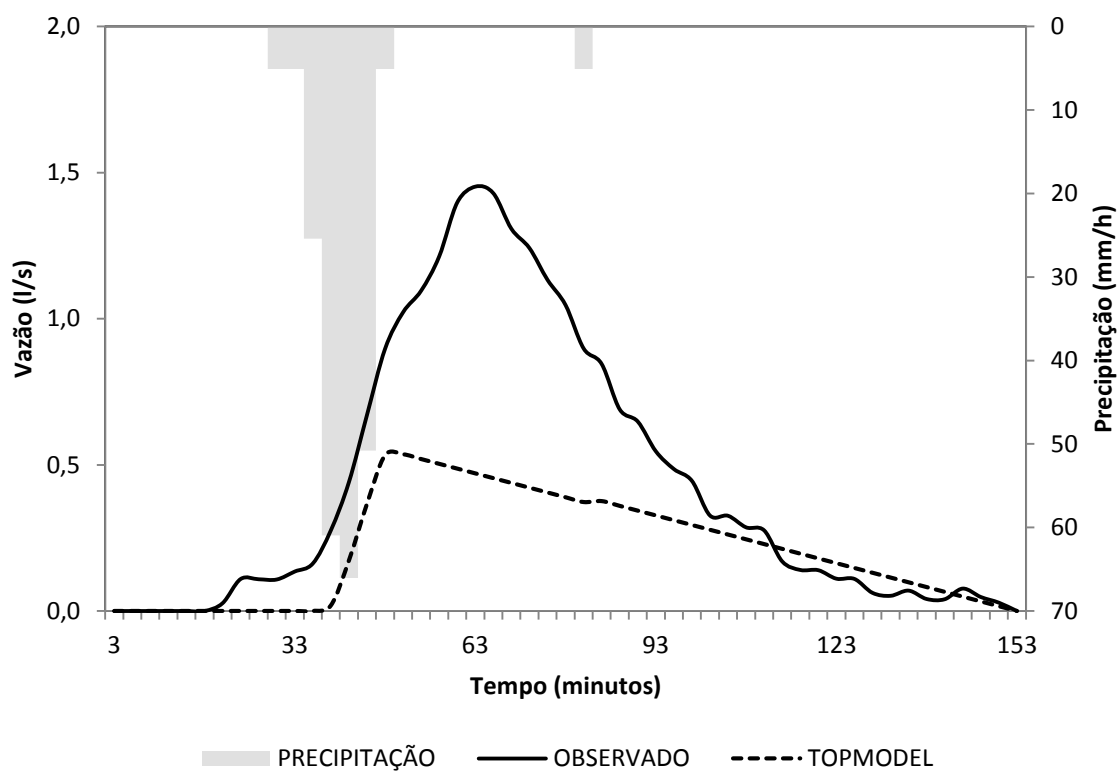


Figura 32A - Vazão observada e simulada no processo de validação, correspondente ao Evento 19 no dia 28/12/2011.

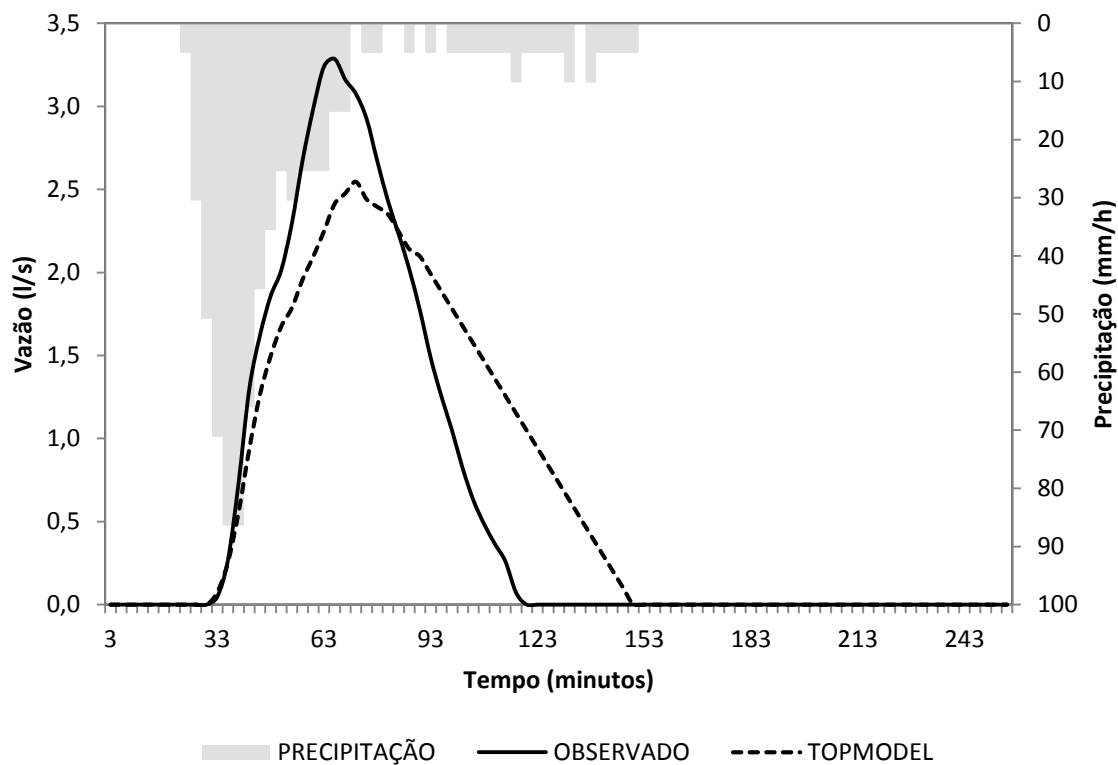


Figura 33A - Vazão observada e simulada no processo de validação, correspondente ao Evento 20 no dia 28/12/2011.