



XII SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE

ESTUDOS DOS EFEITOS DAS MUDANÇAS GLOBAIS NA BACIA DO RIO MADEIRA

Lucas Garofolo Lopes¹; Daniel Andres Rodriguez²; José Lázaro de Siqueira Júnior³

RESUMO: O quarto relatório do IPCC mostra que um grande número das projeções dos modelos atmosféricos concorda na tendência de incrementos na frequência e valor de eventos extremos. O objetivo deste estudo foi analisar esses eventos, sob impacto dos efeitos das mudanças globais na bacia do Rio Madeira. Desta forma, foram utilizadas projeções de descargas máximas com base nas vazões geradas pelo modelo hidrológico (MHD-INPE), alimentando-o com dados de modelos atmosféricos (ETA-CPTEC, MIROC5, CSIRO-MK3.6.0, IPSL e HadGEM2). Foram aplicados dois métodos para obtenção do Tempo de Recorrência: a Distribuição Generalizada de Pareto (GPD) e Distribuição Generalizada de Extremos (GEV). As projeções de ambos os métodos retornam vazões máximas de 2, 5, 10, 50 e 100 anos para o exutório da Bacia do Rio Madeira, no período histórico e nos períodos futuros 2011-2040, 2041-2070 e 2071-2100. Os resultados apresentam uma variabilidade entre modelos durante o período histórico, com o GEV subestimando as vazões, e o GPD superestimando-as. Na maioria dos modelos, a metodologia GEV mostra a diminuição das descargas com menores tempos de retorno, em contrapartida, a aplicação do GPD resulta, em geral, no incremento das descargas máximas sob o impacto das mudanças climáticas.

ABSTRACT: The Fourth Assessment Report IPCC shows that a large number of projections of Atmospheric models agree on the trend of increase in the frequency and value of extreme events. The aim of the study was to analyze these events, under the impact of global changes in Madeira River Basin. Thus,

¹ Centro de Ciência do Sistema Terrestre – e-mail: lucas.garofolo@inpe.br

² Centro de Ciência do Sistema Terrestre – e-mail: daniel.andres@inpe.br

³ Centro de Ciência do Sistema Terrestre – e-mail: jose.lazaro@cptec.inpe.br

projection of discharges were used based on flow generated by hydrological model (MHD-INPE), entering data of atmospheric model (ETA-CPTEC, MIROC5, CSIRO-MK3.6.0, IPSL e HadGEM2). Two methods were applied to obtain recurrence time: Generalized Pareto Distribution (GPD) and Generalized Extreme Value Distribution (GEV). The projection from both methods return maximum flows of 2, 5, 10, 50 and 100 years for Madeira River Basin, in current time and futures scenarios (2011-2040, 2041-2070 and 2071-2100). The results show a variability between models during current time, with GEV underestimating the flows, and GPD overestimating. For most models, GEV shows a flow decrease with lower recurrence time, on the other hand, GPD application results, in general, an maximum flow increase under impact of climate changes.

Palavras-chave: eventos extremos climáticos

1 – INTRODUÇÃO

A Bacia Amazônica é a maior bacia hidrográfica do mundo, abrangendo uma área de 7 milhões de km², estendendo-se por Colômbia, Equador, Venezuela, Bolívia e Peru, onde se encontra a nascente do rio que dá o nome da bacia, o Rio Amazonas. Os rios, córregos e ribeirões são de extrema importância no Amazonas, possuindo uma topografia plana e cursos de água caudalosos, facilitando o transporte fluvial, principal meio de transporte da região Norte.

Extremos climáticos são definidos como sendo a ocorrência de um evento climático com valores acima ou abaixo de um valor limite, como é o caso das cheias e secas, respectivamente. Eventos estes, acarretados por mudanças climáticas serão mais frequentes, resultando em alterações nas intensidades, duração e extensão territorial dos extremos climáticos.

Sob este foco, o Estudo das mudanças globais na bacia do rio Madeira foi elaborado, visando analisar as vazões para tempos de retorno de 2, 5, 10, 50 e 100 anos. Através de simulações com modelo hidrológico alimentado por dados provenientes do modelo atmosférico ETA-CPTEC e modelos globais utilizados no *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5*. Para medir os extremos máximos foi utilizado duas metodologias da Teoria de Valores Extremos (EVT): uma metodologia que utiliza somente os valores máximos de vazão de cada ano, denominada Distribuição Generalizada de Valores Extremos (GEV – *Generalized Extreme Value distribution*) e, uma metodologia que estuda os excedentes de um limiar, determinado através da média residual da série temporal de vazão, conhecido como Distribuição Generalizada de Pareto (GPD – *Generalized Pareto Distribution*), ambas sob o pressuposto de estacionariedade.

Foi realizada uma comparação das projeções de extremos entre os modelos atmosféricos globais e a vazão observada, visando à importância nos estudos que os eventos extremos estão atualmente, como é o caso do Relatório Especial sobre Gerenciamento de Riscos de Eventos

Extremos e Desastres do Painel Intergovernamental de mudanças climáticas (IPCC – SREX) (2012).

2- BACIA DO RIO MADEIRA

A bacia do rio Madeira possui superfície de 1.420.000 km² representando 23% do total da bacia Amazônica, tendo 51% do seu território na Bolívia, 42% no Brasil e 7% no Peru, possuindo as seguintes unidades proporcionais: Andes (15%), planície Amazônica (44%) e território brasileiro (41%). A Figura 1 mostra a localização da bacia do rio Madeira dentro da Bacia Amazônica e dividida entre seus países.

O clima é do tipo equatorial (quente e úmido), com zonas de instabilidade climáticas, influenciados por fenômenos de circulação atmosférica, chuvas intensas, alto índice de vazão e umidade da esfera gasosa que envolve a terra (RIBEIRO NETO, 2006). A precipitação média anual na bacia é de 1.940 mm.

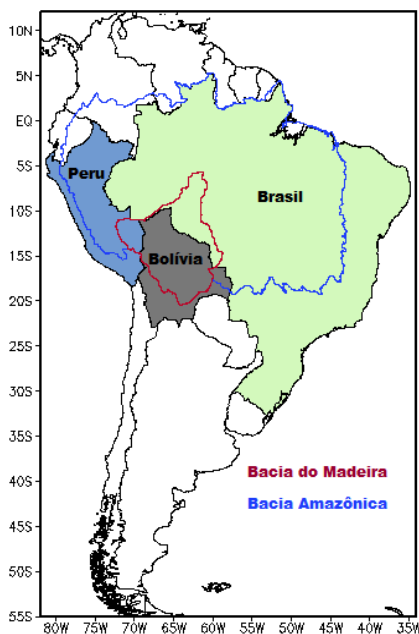


Figura 1 - Área da bacia Amazônica e a bacia do Rio Madeira

3 – MODELO HIDROLÓGICO MHD-INPE

A parametrização do MGB-INPE combina a formulação probabilística de distribuição de colunas de água nos pontos de grade como no modelo Xinanjiang (ZHAO, 1992; ZHAO; LIU, 1995) com os princípios utilizados no TOPMODEL (BEVEN; KIRKBY, 1979) para simular a resposta hidrológica. A posição do nível freático é calculada no modelo como uma proporção da

XII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste

quantidade d'água em excesso sobre a capacidade de campo em cada reservatório, seguindo a formulação do modelo DHSVM (WIGMOSTA et al, 2002). A perda d'água por interceptação é simulada no modelo através da metodologia proposta por Gash et al. (1995). A captura d'água da vegetação desde o solo é resolvida considerando o modelo de distribuição de raízes de Jarvis (1989). A bacia é subdividida em células regulares, comunicadas por canais de drenagem representando a rede de drenagem da mesma. Cada célula está dividida em blocos de uso do solo, que resultam da combinação da vegetação, do tipo do solo e do uso da terra.

4 – DADOS E METODOLOGIA

Os dados meteorológicos observados utilizados na elaboração deste trabalho foram obtidas da base de dados do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, dos Serviços de Meteorologia e Hidrologia (SENAMHI) do Peru e Bolívia e as informações sobre as estações fluviométricas foram obtidas da Agência Nacional de Águas – ANA.

Os cenários de projeções climáticas utilizados no estudo foram obtidos a partir de 5 modelos distintos. Foram utilizadas as informações dos cenários (CTL, LOW, MED, HIG) do *downscaling* dinâmico das projeções globais do modelo HadCM-3, desenvolvidas pelo modelo atmosférico ETA-CPTEC (Chouet *al.*, 2011), projeções globais do modelo MIROC5 desenvolvido pelo Center for Climate System Research (CCSR) da Universidade de Tokyo (Watanabe et al., 2010), projeções também do CSIRO-MK3, atualização do GCM CSIRO-MK3.5 (Gordon et al., 2002), projeções do modelo francês IPSL-CM5B (Dufresne, 2011) e também do *Hadley Centre Global Environmental Model2*, conhecido como HadGEM2 (Collins *et al.*, 2011), sendo esses quatro últimos escolhidos com base nos modelos coordenados pelo CMIP5 (IPCC, 2007).

4.1 – Métodos probabilísticos para análise de valores extremos

Utilizando as séries temporais de vazão observadas e geradas pelo modelo MHD-INPE, foram aplicados dois métodos probabilísticos para o estudo dos extremos máximos. As séries de descargas simuladas alimentadas com as projeções dos modelos atmosféricos, foram utilizadas para estas análises, juntamente com os dados de descargas observados na estação fluviométrica de Fazenda Vista Alegre, no exutório da Bacia. Foram calculadas as descargas extremas para tempos de retorno frequentes como 2, 5 e 10 anos, e os menos frequentes para 50 e 100 anos em ambas as distribuições probabilísticas, para cada um dos períodos considerados.

4.1.1 – GEV – Distribuição Generalizada de Valores Extremos

A Distribuição Generalizada de valores Extremos, conhecida pela sigla GEV, é uma distribuição onde são analisados os eventos extremos durante um intervalo de tempo ou em blocos. Neste projeto foram utilizados os máximos anuais de vazão nos períodos de 1970 a 1990, 2011 a 2040, 2041 a 2070, e 2071 a 2100. A função GEV foi proposta por Jenkinson (1955) e também conhecido como distribuição de Von Mises-Jenkinson.

Esta distribuição aplica o pressuposto de estacionariedade das séries temporais de vazão, em que as descargas máximas seguem a mesma verossimilhança no decorrer do período, e sua distribuição probabilística é conhecida. Tratando deste pressuposto, o conceito de independência também é aplicado, onde um máximo não tem correlação com o máximo posterior nem com o anterior.

4.1.2 – GPD – Distribuição Generalizada de Pareto

Expondo o conceito de excedentes sobre um limiar, utilizamos a Distribuição Generalizada de Pareto (GPD). Essa metodologia consiste num suposto de uma sequência de medições independentes e identicamente distribuídos, onde valores máximos são identificados pelos excessos de um limiar determinado e suficientemente grande.

A escolha de um limiar u é parte fundamental na implementação desta metodologia, pois um valor muito elevado irá resultar em poucos máximos na série, e um limiar baixo incluirá vazões que podem alterar os resultados finais nos tempos de retorno. Coles (2001) conceitua que um limiar apropriado para a distribuição Pareto deve ser escolhido através de uma média residual aproximadamente linear com o limiar (u), considerado assim uma aproximação válida para o excesso da distribuição.

Analisando as médias residuais - *Mean Residual Life* - (exemplo na Figura 3) das séries temporais de vazão, consentiu-se a escolha de apenas um valor de iteração e limiar, que fosse suficiente para que gerasse descargas máximas extremas satisfatórias para todos os modelos e períodos.

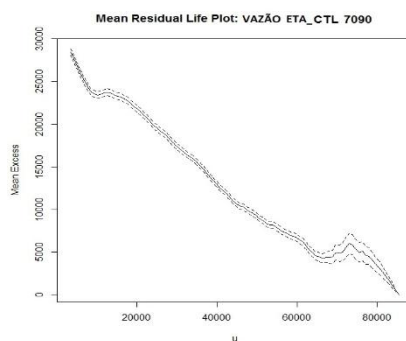


Figura 2 - Média Residual do cenário CTL do modelo global ETA-INPE, sendo u o limiar.

5 – RESULTADOS

Nas projeções geradas com a metodologia GEV, os resultados das simulações com base nos resultados dos modelos atmosféricos apresentaram vazões inferiores às obtidas a partir da série de descargas observadas. Apenas o experimento que utiliza dados do modelo global CSIRO apresenta valores similares com os da linha de base - Vazões observadas (Fig. 3).

Diferente da metodologia anterior, as descargas calculadas com a Distribuição Generalizada de Pareto, doravante GPD, apresentaram, em geral, menor incremento com o período de retorno (Figura 3). A função GPD não obteve um ajuste adequado à série de vazões do modelo IPSL, mostrando uma vazão de aproximadamente $250.000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ em 100 anos de tempo de retorno. A série de dados observados apresentou menor incremento das descargas assim como os demais modelos, apresentando valores análogos ao experimento que utilizou dados do modelo global MIROC5.

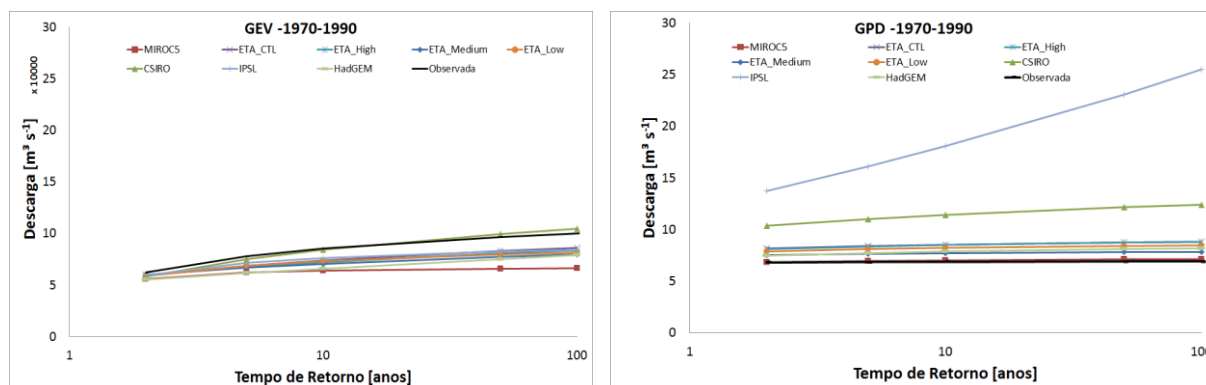


Figura 3 - Vazões máximas, para diferentes tempos de retorno utilizando o método GEV e GPD, projetadas na Bacia do Rio Madeira, estação Fazenda Vista Alegre no período de 1970 a 1990.

A Figura 4 apresenta a diferença de vazões por tempo de retorno - Q_{tr} - obtido para cada período no futuro (2011 – 2040, 2041 - 2070, 2071-2100) subtraindo o Q_{tr} do presente (1970 – 1990) para todos os modelos. Nas projeções das descargas futuras, a metodologia GEV apresentou um menor incremento nas descargas nos tempos de retorno até 10 anos e um incremento nas descargas associadas com tempos de retorno maiores (Figura 4 (a), (c), (e) e Tabela 3.a, b e c). Já nos resultados obtidos com a GPD, a maioria dos experimentos apresenta incremento das descargas associados a todos os tempos de retorno até o final do século (Figura 4 (b), (d), (f) e Tabela 4.a, b, c). As projeções que utilizam dados do modelo IPSL mostram uma redução das descargas desde 2011 até o final do século. Nas que utilizam dados do modelo CSIRO a redução acontece a partir de 2041.

Em ambos os resultados os maiores incrementos das descargas aparecem nos experimentos do período 2011-2040 que utilizam os dados do modelo atmosférico Eta-High. Nas análises GEV, as maiores diminuições também aparecem associadas a Eta-High, mas no período final. Por outro lado,

a redução das descargas projetadas com dados do modelo IPSL domina em todos os períodos nas análises GPD, mas este resultado está associado com um ajuste não satisfatório da função de Pareto aos dados. O modelo global CSIRO também demonstrou diminuições nas suas vazões, porém com menos intensidade, no começo e no final do século.

Nas análises destes resultados, resulta importante salientar que as mesmas foram realizadas em períodos de 30 anos. Disto se desprende que os valores obtidos para as descargas associadas com tempos de retorno de 50 e 100 anos correspondem a uma extrapolação das distribuições de frequências utilizadas.

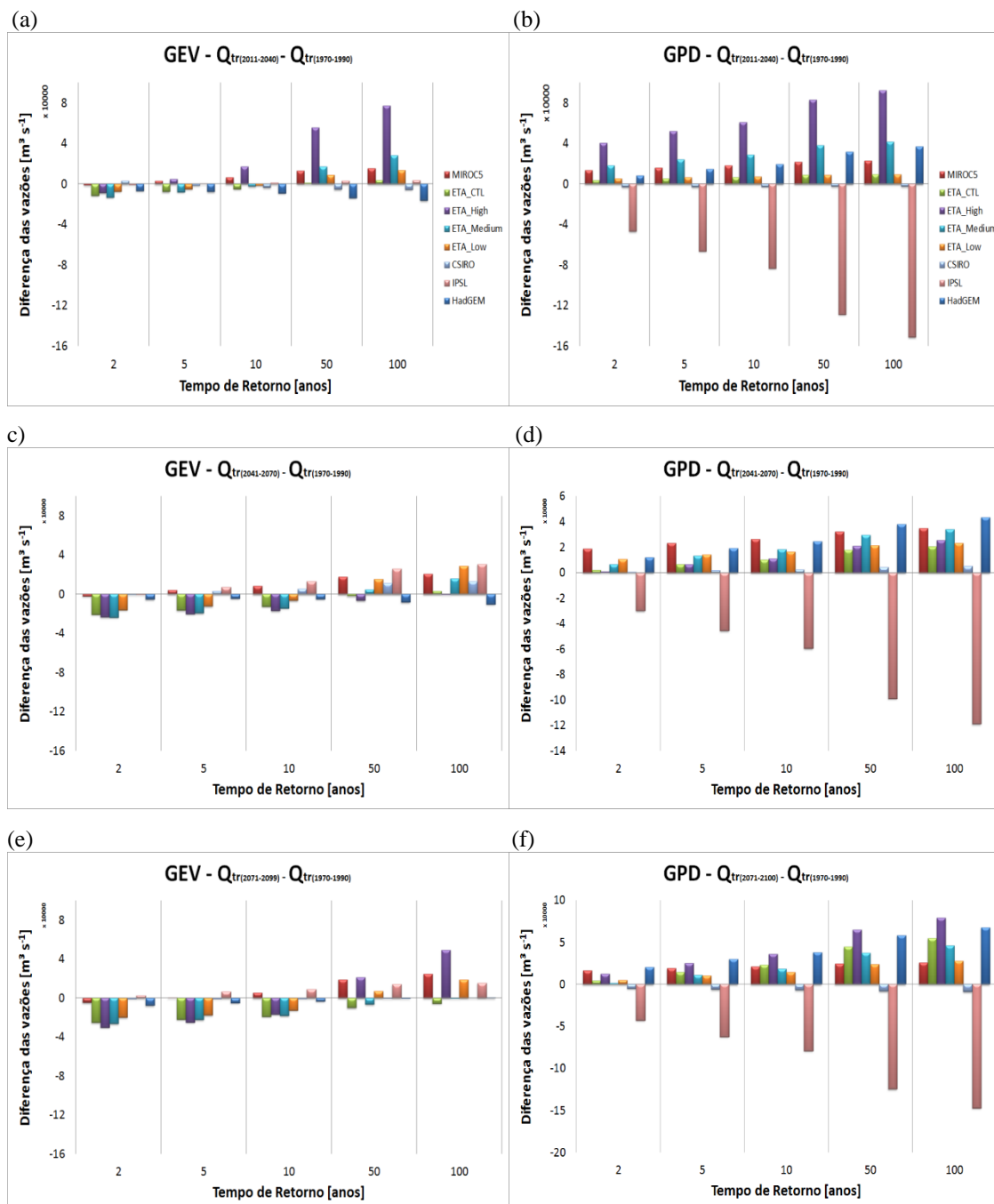


Figura 4 – Diferença de vazões entre os resultados obtidos de 2011 a 2040 e 1970 a 1990 (a) e (b), 2041 a 2070 e 1970 a 1990 (c) e (d) e 2071 a 2100 e 1970 a 1990 (e) e (f) com a metodologia GEV e GPD

6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS

As análises desenvolvidas mostraram que existe uma importante dispersão entre resultados, não apenas associada com as diferentes projeções atmosféricas, mas principalmente com a metodologia de estudo, principalmente nas descargas máximas menos frequentes. Esta dispersão representa limitações na transferência de informações para tomadores de decisão e precisa ser abordada através de análises de incertezas que permita a seleção de estratégias robustas.

Por outro lado, ambas as metodologias foram aplicadas sob o suposto de estacionariedade, ou seja, considerando que os parâmetros das distribuições permanecem constantes no tempo. A separação da série temporal em períodos, como no caso deste trabalho, permite o relaxamento desta premissa, considerando apenas a variação das distribuições entre períodos. Não obstante, tendências nos parâmetros ainda podem persistir que precisam ser abordadas através de metodologias que consideram a não-estacionariedade das séries.

A continuação deste trabalho implicará na aplicação das mesmas séries de vazão transformando-as de maneira satisfatórias, para o pressuposto da não-estacionariedade, buscando resultados mais concretos em se tratando de mudanças climáticas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Chou SC, Marengo JA, Lyra AA, Sueiro G, Pesquero JF, Alves LM, Kay G, Betts R, Chagas DJ, Gomes JL, Bustamante JF, Tavares P (2011) **Downscaling of South America present climate driven by 4-member HadCM3 runs.** ClimDyn. doi:10.1007/s00382-011-1002-8

Coles, Stuart. **An introduction to statistical modeling of extreme values.** University of Bristol. p. 79. 2001

Collins *et al.*, W.j., 2011: **Development and evaluation of an Earth-System model – HadGEM2.** Met Office Hadley Centre, Exeter, UK, 2011.

Dufresne, J. L. *et a*, 2013. **Climate change projections using the IPSL-CM5 Earth System Model: from CMIP3 to CMIP5.** Springerlink, p.2125, 2013.

GASH, J.H.C.; Lloyd, C.R.; Lachaud, G. Estimating sparse forest rainfall interception with an analytical model. **Journal of Hydrology**, v. 170, p. 79-86, 1995.

IPCC, **Cambridge Univ. Press.** 2007

JARVIS, N.J. A simple empirical model of root water uptake. **Journal of Hydrology**, v. 107, p. 57-72, 1989.

RIBEIRO NETO, ALFREDO: **Simulação Hidrológica na Amazônia: Rio Madeira [Rio de Janeiro] 2006**.XVII, 178 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, D.Sc.,Engenharia Civil, 2006). Tese - Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE.

ZHAO, R.J. and Liu, X.R. The Xinanjiang model. In: Singh, V.P. (Ed.) **Computer Models of Watershed Hydrology**. Highlands Ranch: Water Resources Publication, 1995. p. 215–232.

Watanabe, Masahiro *et al.* **2010: Improved Climate Simulation by MIROC5: Mean States, Variability, and Climate Sensitivity**. *J. Climate*, **23**, 6312–6335

WIGMOSTA, M.S.; Nijssen, B.; Storck, P.; Lettenmaier, D.P. The Distributed Hydrology Soil Vegetation Model, In: Singh, V.P.; Frevert, D.K. (Ed.) **Mathematical Models of Small Watershed Hydrology and Applications**. Littleton, CO: Water Resource Publications, 2002, p. 7-42.