

SIMULAÇÃO DE PRECIPITAÇÃO COM DURAÇÃO HORÁRIA MEDIANTE O USO DO MODELO BARTLETT-LEWIS DO PULSO RETANGULAR MODIFICADO

SIMULATION OF HOURLY PRECIPITATION BY THE USE OF MODIFIED BARTLETT-LEWIS RECTANGULAR FLOW PATTERN

Rita de Cássia Fraga Damé¹; Claudia Fernanda Almeida Teixeira²; Raquel Paula Lorensi³

- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA -

RESUMO

A modelagem da precipitação é importante na área da engenharia hidráulica, visto que existe maior disponibilidade de dados diários de precipitação que horários, sendo esses os mais utilizados como entrada de modelos que fazem a transformação de chuva em vazão em uma bacia hidrográfica. Ao longo do tempo muitos modelos têm sido desenvolvidos com o objetivo de simular a precipitação com duração inferior a diária, no entanto, o problema destes consiste no número excessivo de parâmetros a serem estimados aumentando com isto as incertezas embutidas no processo. Em vista disso, foram desenvolvidos modelos parcimoniosos de estimativa da precipitação, como é o caso do Modelo Bartlett-Lewis do Pulso Retangular Modificado, que com apenas seis parâmetros estimados mensalmente simula a precipitação horária. Neste sentido, o objetivo do trabalho é apresentar modelos de precipitação existentes dando ênfase, no entanto, nos modelos que seguem o Processo Poisson onde situa-se o Modelo Bartlett-Lewis do Pulso Retangular.

Palavras-chave: modelagem estocástica de precipitação, processo Poisson, simulação.

ABSTRACT

The modelling of precipitation is important in the area of hydraulic engineering since there is larger availability of daily precipitation data than hours of rain, which are more utilized as the entrance of patterns which make the transformation of rain flow into a hydrographic basin. Along time many patterns have been developed with to simulate a precipitation with an inferior daily duration, nevertheless, the problem consists in the excessive number of parameters that are calculated, increasing the uncertainties built-in the process. Therefore, researches in the modelling of precipitation area made progress and more economical patterns started being developed, as the case of Bartlett-Lewis Modified Rectangular Flow Pattern, which with just six parameters monthly calculated, simulates the hourly precipitation. The purpose of this bibliographic review is to present the several patterns of precipitation giving emphasis for those that follow the Poisson Process where the Bartlett-Lewis Modified Rectangular Flow Pattern are located.

Key words: stochastic precipitation shape, Poisson process, simulation.

INTRODUÇÃO

Em projetos na área de recursos hídricos, é necessário conhecer a série de registros de vazões. Essa deve ser representativa dos eventos ocorridos na bacia hidrográfica, e, por consequência, composta de dados de um longo número

de anos. A partir desses dados, o engenheiro busca conhecer a cheia de projeto, que é a maior enchente para a qual uma dada obra hidráulica será projetada.

Em contrapartida a essa necessidade, esses dados são escassos, se é que eles existem. Essa falta deve-se ao seu alto custo de obtenção.

Nesse sentido, muitas vezes o engenheiro precisa usar dados de chuva para obter os dados de vazão procurados. Isso é feito mediante modelos matemáticos que fazem a transformação chuva-vazão.

Uma vez que a chuva é considerada a principal entrada de água na bacia hidrográfica, o conhecimento de suas características pode representar a solução para muitos problemas hidrológicos (BURLANDO & ROSSO, 1993).

A modelagem da precipitação não é uma tarefa simples devido à variabilidade temporal e espacial exibida por esse fenômeno.

WAYMIRE & GUPTA (1981) mencionam que ao longo do tempo, muitos modelos vêm sendo propostos, e está claro que não existe uma forma única de modelagem. Isso, pelas características do fenômeno em si, pelas ferramentas matemáticas e estatísticas disponíveis, bem como pelo objetivo que se deseja atingir quando se modela esse processo.

De maneira geral, a modelagem da precipitação pode ser feita na forma determinística ou estocástica, dependendo do objetivo a que se propõe.

A modelagem determinística da precipitação usa informações meteorológicas como a pressão atmosférica, temperatura, umidade relativa do ar, velocidade do vento, entre outros. Como o número de variáveis envolvidas é grande, a modelagem torna-se complexa, pois, por consequência, o número de parâmetros a serem estimados também é grande.

Porém, quando o objetivo é a geração de séries temporais de precipitação para serem utilizadas em modelos de infiltração, chuva-vazão, planejamento de redes de esgotos, entre outros, os modelos utilizados são os estocásticos (RODRIGUEZ-ITURBE et al., 1987a,b; ENTEKHABI et al., 1989; ONOF & WHEATER, 1993; VELGHE et al., 1994; KHALIQ & CUNNANE, 1996).

Modelar um processo significa usar uma estrutura matemática apropriada, onde são incorporados parâmetros relacionados ao processo físico envolvido, de tal forma que a série simulada resultante represente o processo que está sendo modelado.

¹Eng. Agríc., Dra., Prof^a. do Depto de Engenharia Agrícola, FEA/UFPe Caixa Postal 354, CEP 96010-900, Pelotas. E-mail: ritah2o@hotmail.com.

² Prof^a Eng. Agríc., Dra., Prof^a. do Depto de Engenharia Agrícola, FEA/UFPe Caixa Postal 354, CEP 96010-900, Pelotas. E-mail: cfteixe@ig.com.br.

³ Acadêmica do Curso de Engenharia Agrícola da UFPe.

Sendo a precipitação uma variável aleatória, ou seja, seu valor numérico não pode ser predito com certeza, antes que o evento ocorra (BENJAMIN & CORNELL, 1970), a modelagem do seu processo é feita estocasticamente. Segundo WHEATER et al. (2000), nesse tipo de modelagem, o comportamento determinístico detalhado é substituído por suposições estocásticas simples, onde um pequeno número de parâmetros com interpretação física do processo modelado é utilizado para a representação deste.

A escolha de modelar séries temporais de chuva de maneira estocástica, e não determinística, deve-se à complexidade e forte dependência das condições iniciais que desencadeiam o processo de precipitação (CALENDA & NAPOLITANO, 1999).

A forma estocástica tradicional de modelar a precipitação utiliza cadeias de Markov para simular a ocorrência da precipitação. De acordo com HUTCHINSON (1990) a quantidade de chuva precipitada é simulada, nesse caso, através de uma distribuição de probabilidade como a gama com dois parâmetros.

Os modelos que utilizam as cadeias de Markov têm sido estendidos de forma que contemplem a não-estacionariedade. Um exemplo disso é o trabalho de STERN & COE (1984), que utilizaram cadeia de Markov não-estacionária para verificar a ocorrência ou não de chuva (0-dias secos; 1-dias chuvosos), e a distribuição gama com parâmetros que variavam com a época do ano, para determinar as quantidades de chuva (mm). Os autores concluíram que o modelo proposto é considerado adequado para o planejamento agrícola, porque incorpora a variação no tempo representada pelas séries de Fourier e, ainda, representa as características convectivas da precipitação na região considerada.

Um outro exemplo de modelo estocástico de simulação de chuva, que usa cadeias de Markov, é o trabalho de HUTCHINSON (1990). Esse autor construiu um modelo com estrutura Markoviana de três estados. O estado "0" refere-se ao período seco; o estado "1" é a transição do período seco para o úmido; e o estado "2" representa o período úmido. O autor testou esse modelo utilizando 25 anos de dados horários da cidade de Spokane, Washington – EUA, nos meses de dezembro e janeiro, e também 28 anos de dados de Denver, Colorado – EUA. Ele concluiu que o seu modelo apresenta limitações no que se refere às estatísticas horárias da série simulada. RODRIGUEZ-ITURBE et al. (1987b) utilizaram esse conjunto de dados para ajustar um modelo baseado na teoria do processo pontual.

Deve-se enfatizar que os modelos estocásticos que utilizam cadeias de Markov são um tanto complexos quando se trata da modelagem de precipitações máximas (DAMÉ, 2001). Isso acontece porque existe dependência entre as precipitações que ocorrem em dias sucessivos. Ocorre ainda uma complexidade adicional nesse tipo de modelagem, quando se utilizam técnicas de desagregação, para inferir informações de precipitações individuais a partir de valores diários.

Uma consideração importante a ser feita é que os modelos estocásticos de estrutura Markoviana não levam em consideração o agrupamento de células de chuva, que é uma característica claramente exibida pela precipitação, tanto em nível espacial quanto temporal e, por isso, são considerados limitados quando se trata de modelagem das precipitações máximas. Essa característica do processo de precipitação faz com que a análise seja estendida para momentos estatísticos de segunda ordem — variância, covariância, coeficiente de autocorrelação — no sentido de conseguir maior aproximação

com o fenômeno físico envolvido. COX & MILLER (1970), KAVVAS & DELLEUR (1981) e RODRIGUEZ-ITURBE (1986) citam que a Teoria do Processo Pontual é a que melhor tem representado esse fenômeno.

COX & MILLER (1970) afirmam que os modelos baseados na Teoria do Processo Pontual permitem a modelagem da ocorrência dos eventos e das posições que esses ocupam. Essa teoria pode ser aplicada nas dimensões espacial e temporal, ou em ambas simultaneamente, conforme o trabalho de RODRIGUEZ-ITURBE (1986).

Os modelos estocásticos de simulação de chuva que se baseiam nessa teoria fundamentam-se no trabalho de Le Cam (1961) apud KAVVAS & DELLEUR (1981).

O Processo Poisson é adequado para utilização na modelagem da precipitação, pelo fato de suas características de estacionariedade, não-multiplicidade e independência serem compatíveis com as exibidas pelo fenômeno de chuva. Sob o ponto de vista temporal, o princípio da estacionariedade supõe que a probabilidade de ocorrência de um evento em um curto intervalo de tempo, t a $t+\Delta t$, é aproximadamente $\lambda\Delta t$, para qualquer t , em que λ é a taxa média de chegada do evento de precipitação. A não-multiplicidade significa que a probabilidade de ocorrência de dois ou mais eventos em t a $t+\Delta t$, é desprezível, quando comparada com as suas probabilidades de ocorrência em $\lambda\Delta t$. Já o princípio da independência, de acordo com BENJAMIN & CORNELL (1970), considera que o número de eventos em qualquer intervalo de tempo é independente do número desses em qualquer outro intervalo.

Dentre os diversos modelos de simulação de chuva fundamentados na Teoria do Processo Pontual, encontram-se os do pulso retangular, baseados nos agrupamentos de células de chuvas.

Segundo RODRIGUEZ-ITURBE et al. (1987ab), esses modelos representam o fenômeno de chuva para uma ampla faixa de escalas temporais. Essa característica faz com que tais modelos sejam ferramentas úteis na maioria dos estudos hidrológicos, servindo para a avaliação na produção do escoamento superficial e predições de vazões, dentre outras aplicações. Esses autores salientam que é necessário considerar a sensibilidade de tais modelos quanto à distribuição dos períodos secos e úmidos, uma vez que essa é importante no que diz respeito à resposta da bacia hidrográfica. VELGHE et al. (1994) destacaram que os modelos que falham nessa representação produzem resultados pobres de simulação de chuva.

Dentre os modelos construídos que usam a Teoria do Processo Pontual em sua estrutura, existem diferentes níveis de complexidade que são utilizados para representar as características da chuva. Há os que buscam simular a precipitação considerando apenas um nível de agregação temporal, como é o caso dos modelos Poisson Ruído Branco e Poisson do Pulso Retangular. Também existem os que representam esse fenômeno para uma ampla faixa de escalas de tempo, como os modelos do Processo Neyman-Scott e Bartlett-Lewis.

O Modelo Poisson Ruído Branco referenciado em RODRIGUEZ-ITURBE et al. (1984), por exemplo, assume que a chegada de cada evento de precipitação é representado pelo Processo Poisson, e que a chuva possui altura aleatória (mm), mas não faz qualquer descrição da duração do mesmo.

De acordo com RODRIGUEZ-ITURBE et al. (1987a), o Modelo Poisson do Pulso Retangular descreve a evolução temporal do processo de precipitação como uma seqüência de pulsos retangulares associados com o Processo Poisson de

chegada dos eventos, sendo que esses pulsos possuem alturas e comprimentos aleatórios que representam a intensidade e a duração da chuva. A estrutura desse modelo supõe que os eventos sejam variáveis aleatórias independentes e identicamente distribuídas ao longo do tempo.

A modelagem da precipitação evoluiu, e neste sentido, foram desenvolvidos modelos baseados na Teoria do Processo Pontual de Agrupamento, que permite a representação das características estatísticas desse fenômeno para diversas escalas temporais. Exemplos desses modelos são encontrados nos trabalhos de RODRIGUEZ-ITURBE et al. (1987b), VELGHE et al. (1994), BO et al. (1994) e COWPERTWAIT et al. (1996). Nos modelos pontuais de agrupamento a origem dos eventos de precipitação é representada pelo Processo Poisson, sendo cada ponto substituído por um agrupamento de pontos ou de células de chuva, cuja origem está relacionada com o centro do grupo.

Da mesma forma que o modelo Poisson do Pulso Retangular, os modelos pontuais de agrupamento possuem a estrutura de pulso retangular, cujo significado físico está associado à duração e intensidade de cada célula de chuva. Os processos Bartlett-Lewis e Neyman-Scott fazem parte dos modelos de agrupamento.

Na modelagem da precipitação utilizando o processo Neyman-Scott, RODRIGUEZ-ITURBE et al. (1987a) partiram do pressuposto de que a origem dos eventos de precipitação pode ser representada pelo Processo Poisson e, de que um número aleatório de células de chuva está associado com a ocorrência de cada evento. Os pontos de origem das células são independentemente deslocados, por distâncias exponencialmente distribuídas, onde nenhuma célula se localiza no ponto de origem do evento. As células de chuva são consideradas como pulsos retangulares, cuja duração e altura são variáveis aleatórias que se distribuem exponencialmente. Já os grupos de células associados aos diferentes eventos são considerados independentes.

No caso do modelo Bartlett-Lewis, as origens dos eventos também são representadas pelo Processo Poisson, e a cada um está associado um número aleatório de células de chuva que, após um tempo exponencialmente distribuído ocorre a finalização do processo de ocorrência das mesmas. Nesse modelo é suposto que exista uma célula de chuva nos pontos de origem dos eventos, sendo as células consideradas pulsos retangulares, cuja duração e altura são variáveis aleatórias com distribuição exponencial.

Não é possível fazer a escolha empírica entre um e outro modelo, pois a diferença estrutural entre ambos é tênue. A diferença básica entre eles está na localização das células de chuva, que, conforme descrito anteriormente, no processo Neyman-Scott se encontram deslocadas do ponto de origem dos eventos de precipitação, enquanto que no Bartlett-Lewis existe uma célula de chuva no ponto de origem destes.

Resultados obtidos por RODRIGUEZ-ITURBE et al. (1987a), quando ajustaram os modelos Neyman-Scott e Bartlett-Lewis a 28 anos de dados de chuva de Denver, mostraram que as estatísticas de primeira ordem - média - e de segunda ordem - variância, covariância e coeficiente de autocorrelação — foram bem representadas por esses modelos, para a faixa de durações estudadas, quando comparadas às da série histórica. No entanto, houve discrepâncias com relação à proporção do período seco entre os valores simulados pelos modelos e os históricos. Os modelos superestimaram a proporção do período seco, e isso foi preocupante, uma vez que essa característica é importante no processo de transformação chuva-vazão, pois a

precipitação é a entrada do modelo e o volume de escoamento superficial é a resposta.

Dessa forma, RODRIGUEZ-ITURBE et al. (1987b) e ENTEKHABI et al. (1989) modificaram a estrutura dos modelos Bartlett-Lewis e Neyman-Scott, respectivamente, para contornar o problema ocorrido. As alterações feitas foram no sentido de permitir que o parâmetro que especifica a duração das células de chuva variasse aleatoriamente entre as diversas tormentas. Assim, os modelos assumiram que as tormentas são estruturalmente diferentes entre si, e que as células se originam de diferentes populações estatísticas, contemplando as de longa e curta duração.

Dentre os diversos modelos de simulação de chuva encontrados na literatura, um critério que deve ser utilizado na escolha do modelo é a sua habilidade em preservar propriedades estatísticas da precipitação em vários níveis de agregação temporal (VALDES, 1993).

A seguir será descrito, detalhadamente, o modelo Bartlett-Lewis do Pulso Retangular Modificado por RODRIGUEZ-ITURBE et al. (1987b), visto que este tem representado adequadamente o processo físico de precipitação com duração horária.

DESENVOLVIMENTO

Modelo Bartlett-Lewis do Pulso Retangular Modificado (BLPRM)

O modelo BLPRM foi apresentado por RODRIGUEZ-ITURBE et al. (1987b) e é uma forma particular do processo pontual de agrupamento. Embora a descrição geral desse modelo já tenha sido apresentada, nesse item ele será descrito detalhadamente, buscando a definição física de seus parâmetros.

Os parâmetros do modelo BLPRM são λ , ν , κ , μ_x , α e ϕ . Nesse modelo, cada evento de precipitação consiste de uma ou mais células de chuva, e a primeira célula nasce com o início do evento. O tempo de início dos eventos segue o Processo Poisson com taxa λ (Δt^{-1}), ou seja, o tempo entre as transcorrências de início de eventos consecutivos é uma variável aleatória independente e exponencialmente distribuída com média $1/\lambda$ (Δt).

Os tempos de início das células subseqüentes também seguem o Processo Poisson, com taxa $\kappa\eta$ (Δt^{-1}), ou seja, o tempo entre as transcorrências de início de células de chuva são variáveis aleatórias independentes e exponencialmente distribuídas com média $1/\kappa\eta$ (Δt), em que κ é o parâmetro do modelo responsável pela simulação do tempo de início das células de chuva e η é uma variável aleatória associada a cada evento (Δt^{-1}), com distribuição gama, de índice α e parâmetro de escala ν (Δt).

Após um tempo exponencialmente distribuído, com média $1/(\phi\eta)$ (Δt), cessa o nascimento dessas células. Nesse processo o parâmetro ϕ é responsável pela simulação do tempo de fim de origem das células. A figura de um pulso retangular de altura e largura aleatória é usada para representar uma célula de chuva. A altura representa a intensidade de chuva naquela célula e supõe que essa possua distribuição exponencial cuja média seja μ_x ($\text{mm } \Delta t^{-1}$). Já a largura representa a duração que, também, se distribui exponencialmente com média $1/\eta$ (Δt). A chuva total é a soma das chuvas ocorridas em todas as células de chuva associadas aos eventos.

Para uma melhor compreensão de sua estrutura, é apresentado na Figura 1 um esquema ilustrando as diversas etapas que constam na estrutura do modelo BLPRM.

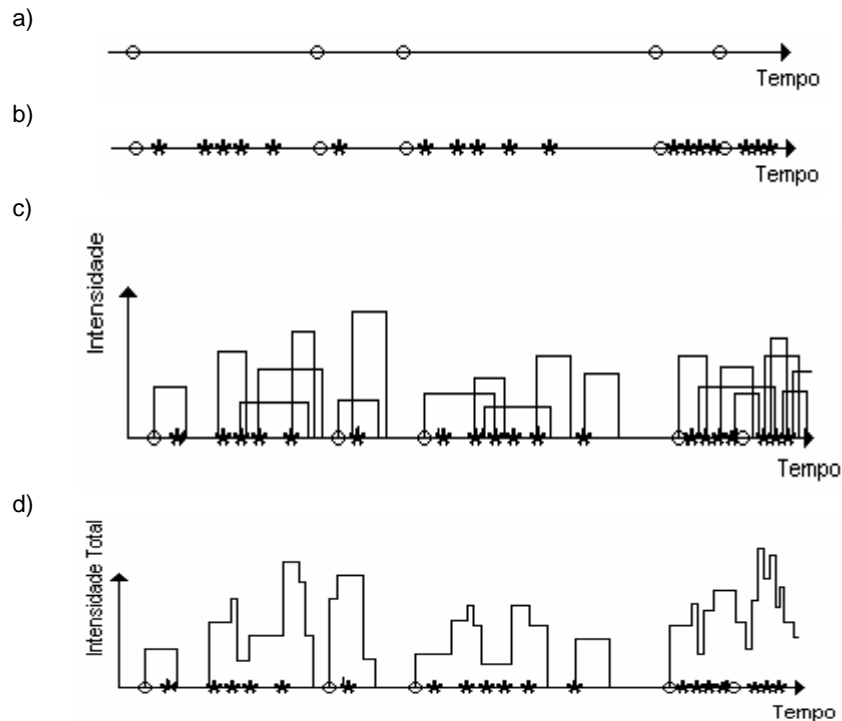


Figura 1 - Esquema do Modelo Bartlett-Lewis do Pulso Retangular Modificado.

Estimativa dos Parâmetros do Modelo Bartlett-Lewis do Pulso Retangular Modificado (BLPRM).

Embora o método da máxima verossimilhança seja clássico na estimativa de parâmetros de modelos, RODRIGUEZ-ITURBE et al. (1987b) questionaram sua aplicação no caso do modelo BLPRM, pois acreditam que a função verossimilhança obtida enfatizaria em demasia a idealização que existe nesse modelo, em termos de descrição da trajetória dos eventos em tempo contínuo. Por essa razão, os parâmetros do modelo BLPRM são estimados, na maioria das vezes, pelo método dos momentos. Trabalhos de RODRIGUEZ-ITURBE et al. (1987b), ISLAM et al. (1990), ONOF & WHEATER (1993), BO et al. (1994), VELGHE et al. (1994) e KHALIQ & CUNNANE (1996) utilizaram esta metodologia.

O método dos momentos baseia-se em se constituir um sistema de q equações não-lineares com p variáveis, que são resolvidas simultaneamente. Os valores obtidos a partir dos dados históricos de precipitação são representados por $f^{(o)} = (f_1^{(o)}, f_2^{(o)}, f_3^{(o)}, \dots, f_q^{(o)})$ e os valores sintéticos de precipitação são obtidos das expressões matemáticas do modelo por $f^{(m)}(z) = (f_1^{(m)}(z), f_2^{(m)}(z), f_3^{(m)}(z), \dots, f_q^{(m)}(z))$, onde z é o vetor p ($= a$ no mínimo 6) $\times 1$ dos parâmetros, e $q \geq p$, uma vez que o modelo BLPRM possui 6 (seis) parâmetros para modelar o fenômeno de precipitação. Os parâmetros do modelo devem ser estimados de maneira que a função objetivo venha a ser um vetor nulo, ou seja, $f^{(m)}(z) - f^{(o)} = 0$.

Deste ponto de vista, percebe-se que a escolha das características estatísticas para o ajuste é essencialmente subjetiva. Ao mesmo tempo, os parâmetros do modelo dependem do conjunto de estatísticas escolhido, bem como dos valores iniciais dados ao algoritmo numérico de minimização, sendo esse aspecto considerado como uma desvantagem para o método dos momentos. Pode ocorrer, ainda, que certos parâmetros sejam altamente correlacionados e que diferentes pares de valores produzam resultados muito semelhantes para a função objetivo utilizada. Isso corresponde

ao fato de a função objetivo ser quase como um plano dentro de alguma região do espaço dos parâmetros. Assim, a conversão para o ponto de mínimo é difícil. Conseqüentemente, diferentes conjuntos de parâmetros podem gerar valores ajustados semelhantes, levando a um mínimo múltiplo dentro da função objetivo.

Por essas razões, é necessário avaliar a qualidade de ajuste do modelo. Essa pode ser avaliada comparando-se as estatísticas que não foram utilizadas no procedimento de ajuste com os seus pares históricos. É esperado, de um modelo bem ajustado, que as diferenças existentes entre os valores sintéticos e observados sejam praticamente nulas.

Diante da subjetividade que ronda os procedimentos de ajuste do modelo BLPRM, buscou-se, junto à literatura, a forma como autores familiarizados com esse modelo fazem o seu ajuste.

No trabalho de RODRIGUEZ-ITURBE et al. (1987b), foram utilizados dois conjuntos de estatísticas para a estimativa dos parâmetros (P_1 e P_2). O conjunto P_1 foi constituído pela média, variância, coeficiente de autocorrelação de retardo 1, proporção do período seco para 1h e variância e proporção do período seco para 24h, enquanto que, o conjunto P_2 pela média, variância, coeficiente de autocorrelação de retardo 1, proporção seca no período de 1h, coeficiente de autocorrelação de retardo 1 e proporção seca em 24h.

Os seis parâmetros do modelo - λ , v , κ , μ_x , α e ϕ - foram ajustados utilizando-se os conjuntos P_1 e P_2 , sendo P_1 uma série de 28 anos de dados de chuva horária de Denver, no período de 15 de maio a 16 de junho e, o conjunto P_2 , utilizado para ajustar os parâmetros do modelo a uma série de 28 anos de chuva horária da cidade de Boston, no mês de julho. Os níveis de agregação temporal estudados foram 1, 6, 12 e 24 horas.

Os autores, acima mencionados, observaram que as correlações para os dados de Boston foram menores que as encontradas com os dados de Denver, quando foi utilizado o

conjunto P₂. Os resultados deste trabalho mostraram que, embora as propriedades da precipitação nas duas localidades sejam diferentes, alguns dos parâmetros são semelhantes. Entretanto, a principal diferença foi em relação às intensidades e durações das células, nas quais a célula individual apresentou, em Boston, duração menor e altura média maior.

No trabalho de ISLAM et al. (1990), a opção na estimativa dos parâmetros também foi direcionada à de um determinado conjunto de estatísticas que contemplaram combinações do momento de primeira e de segunda ordem, os quais foram determinados a partir das séries históricas de precipitação e igualados as expressões analíticas do modelo. Os autores não apresentaram as combinações utilizadas, mas os resultados das estatísticas das séries simuladas de precipitação mostraram que as características estatísticas da série histórica foram preservadas em todos os níveis de agregação estudados (1, 2, 12, 24 e 48 horas).

Com o objetivo de verificar se há diferenças entre as características estatísticas das séries histórica e simulada, em função da forma como os parâmetros do modelo BLPRM são estimados, KHALIQ & CUNNANE (1996) estabeleceram cinco diferentes conjuntos de estatísticas para estimar os seis parâmetros do modelo, utilizando dados de chuva de Valentia (localidade relativamente úmida), e do Aeroporto Shannon (localidade relativamente seca). Para a estimativa dos parâmetros do modelo BLPRM, os autores usaram as seguintes combinações estatísticas: conjunto A - média, variância, coeficiente de autocorrelação de retardo 1, probabilidade de seco para nível de agregação de 6h e probabilidade de seco para nível de agregação de 24h; conjunto B - média, variância, coeficiente de autocorrelação de retardo 1 e probabilidade de seco (todos para 1h) e variância e probabilidade de seco, ambos para 24h; conjunto C — média, variância, coeficiente de autocorrelação de retardo 1 e probabilidade de seco (todos para 1h), coeficiente de autocorrelação de retardo 1 para 6h e probabilidade de seco para 24h; conjunto D — média, variância, coeficiente de autocorrelação de retardo 1 e probabilidade de seco (para 1h), coeficiente de autocorrelação de retardo 1 e probabilidade de seco para 24h; conjunto E — difere dos quatro anteriores, uma vez que é composto por todas as estatísticas em todos os níveis de agregação, ou seja, média (1, 6, 12 e 24h), variância (1, 6, 12 e 24h), coeficiente de autocorrelação de retardo 1 (1, 6, 12, e 24h) e probabilidade de seco (1, 6, 12 e 24h).

As estimativas dos parâmetros do modelo obtidas dos conjuntos A, B, C e D, consistiu na resolução simultânea de seis equações não-lineares, supondo que estas equações tenham uma única solução. Para esses quatro tipos de resolução foram consideradas somente seis estatísticas do processo de chuva e ficou o questionamento sobre o comportamento da série de chuva simulada quando fossem consideradas as dezesseis estatísticas (conjunto E). A comparação entre os valores simulados, obtidos através dos cinco conjuntos de estatísticas, e os valores históricos, foi feita através do cálculo do Erro Relativo Médio Quadrático.

O trabalho de KHALIQ & CUNNANE (1996) leva a pensar que a forma de estimar os parâmetros do modelo BLPRM é um campo que precisa de maior investigação, devido à grande subjetividade envolvida na escolha das estatísticas a serem utilizadas com tal objetivo.

Em relação à variabilidade dos parâmetros, KHALIQ & CUNNANE (1996) observaram que μ_x , que representa a intensidade da célula de chuva ($\text{mm } \Delta t^{-1}$), é o menos variável, enquanto que ν (parâmetro de escala da distribuição gama que controla a estrutura celular de cada tormenta) foi o que

apresentou maior variabilidade. Do mesmo modo, o parâmetro de forma da distribuição gama, α , apresentou uma ampla faixa de valores para a mesma série de dados. Os autores recomendam que se deve ter cuidado com os parâmetros ν e α no procedimento de otimização utilizado, pois valores distintos desses parâmetros podem originar valores semelhantes de estatísticas que não são usadas na estimativa destes. Foi para evitar esse problema que os mesmos utilizaram o conjunto E, com as 16 equações, e concluíram que a série simulada resultante apresenta características estatísticas muito semelhantes às da série histórica.

Quanto à estabilidade dos parâmetros, encontra-se um certo consenso entre os pesquisadores, no sentido de que μ_x e λ são relativamente estáveis, enquanto que α e ν apresentam uma instabilidade aparente (RODRIGUEZ-ITURBE et al., 1987b; ISLAM et al., 1990; VELGHE et al., 1994; KHALIQ & CUNNANE, 1996).

Da literatura, em termos de estimativa de parâmetros do modelo BLPRM, conclui-se que os resultados obtidos da simulação da precipitação são muito sensíveis ao conjunto de estatísticas utilizado na estimativa de seus parâmetros.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Considerando a escassez de dados de vazão observados em pequenas bacias hidrográficas e a necessidade eminente do conhecimento do valor de vazão de projeto, o melhor entendimento do processo de precipitação e a sua transformação em vazão é questão fundamental em projetos na área de Recursos Hídricos.

Concomitante a isto, a realidade da escassez de dados pluviográficos é outra questão eminente. Neste sentido é importante que as informações contidas nos poucos dados pluviográficos existentes sejam exploradas adequadamente com o objetivo, por exemplo, de servirem de entrada nos modelos que façam transformação chuva-vazão.

A modelagem estocástica da precipitação permite que, se conhecendo as características estatísticas de uma série de precipitação, seja possível ajustar os parâmetros de um modelo escolhido e com isto simule-se “n” séries com as mesmas características estatísticas, obtendo com isto uma maior compreensão do processo.

Dentre os diversos modelos existentes no campo da estocástica, em termos de simulação da precipitação, o modelo Bartlett-Lewis do Pulso Retangular Modificado tem apresentado resultados satisfatórios, além de ser um modelo parcimonioso. Sendo assim, a maior utilização deste modelo é recomendada.

REFERÊNCIAS

- BENJAMIN, J.R.; CORNELL, C.A. **Probability, statistics, and decision theory for civil engineers**. New York: McGraw-Hill, 1970. 685p.
- BO, Z.; ISLAM, S.; ELTAHIR, E.A.B. Aggregation – disaggregation properties of a stochastic rainfall model. **Water Resources Research**, Saint Louis, v.30, n.12, p.3423-3435, 1994.
- BURLANDO, P.; ROSSO, R. Stochastic models of temporal rainfall: reproducibility, estimation and prediction of extreme events. In: MARCO, J.B.; HARBOE, R.; SALAS, J.D. (Eds.) **Stochastic Hydrology and its use in water resources systems simulation and optimization**. Amsterdam: Kluwer Academic Publishers, 1993. p.137-173.

- CALENDA, G.; NAPOLITANO, F. Parameter estimation of Neyman-Scott processes for temporal point rainfall simulation. **Journal of Hydrology**, Rome, v.225, n.1-2, p.45-66, 1999.
- COX, D.R.; MILLER, H.D. **The theory of stochastic processes**. London: Methuen & Co. Ltd, 1970. 398p.
- COWPERTWAIT, P.S.P.; O'CONNEL, P.E.; METCALFE, A.V. et al. Stochastic point process modelling of rainfall. I. Single-site fitting and validation. **Journal of Hydrology**, Rome, v.175, n.1-4, p.17-46, 1996.
- DAMÉ, R.C.F. **Desagregação de precipitação diária para estimativa de curvas intensidade-duração-freqüência**. Porto Alegre, 2001. 131f. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- ENTEKHABI, D.; RODRIGUEZ-ITURBE, I.; EAGLESON, P.S. Probabilistic representation of the temporal process by the modified Newman-Scott rectangular pulses model: Parameter estimation and validation. **Water Resources Research**, Saint Louis, v.25, n. 2, p.295-302, 1989.
- HUTCHINSON, M.F. A point rainfall model based on a three - state continuous Markov occurrence process. **Journal of Hydrology**, Rome, v.114, n. 1-2, p.125-148, 1990.
- ISLAM, S.; ENTEKHABI, D.; BRAS, R. et al. Parameter estimation and sensitivity analysis for the modified Bartlett-Lewis rectangular pulses model of rainfall. **Journal of Geophysical Research**, Vancouver, v.95, n.D3, p.2093-2100, 1990.
- KAVVAS, M.L.; DELLEUR, J.W. A stochastic cluster model of daily rainfall sequences. **Water Resources Research**, Saint Louis, v.17, n.4, p.1151-1160, 1981.
- KHALIQ, M. N.; CUNNANE, C. Modeling point rainfall occurrences with the Modified Bartlett-Lewis Rectangular Pulses Model. **Journal of Hydrology**, Rome, v.180, n.1, p.109-138, 1996.
- ONOF, C.; WHEATER, H.S. Modeling of British rainfall using a random parameter Bartlett-Lewis rectangular pulse model. **Journal of Hydrology**, Rome, v.149, n.1-4, p.67-95, 1993.
- RODRIGUEZ-ITURBE, I.; GUPTA, V.K.; WAYMIRE, E. Scale considerations in the modeling of temporal rainfall. **Water Resources Research**, Saint Louis, v.20, n.11, p.1611-1619, 1984.
- RODRIGUEZ-ITURBE, I. Scale of fluctuation of rainfall models. **Water Resources Research**, Saint Louis, v.22, n.9, p.15S-37S, 1986.
- RODRIGUEZ-ITURBE, I.; COX, D.R.; ISHAM, V. Some models for rainfall based on stochastic point process. **Proceedings of the Royal Society of London**, London, Series A, v.410, n.1839, p.269-288, 1987a.
- RODRIGUEZ-ITURBE, I.; COX, D.R.; ISHAM, V. A point process model for rainfall: further developments. **Proceedings of the Royal Society of London**. Series A, London, v.417, n.1853, p.283-298, 1987b.
- STERN, R.D.; COE, R. A model fitting analysis of daily rainfall data. **Journal of the Royal Statistical Society**, London, Series A, v.147, n.1, p.1-34, 1984.
- VALDES, J.B. Issue in the modeling of precipitation. In: MARCO, J.B.; HARBOE, R.; SALAS, J.D. (Eds.) **Stochastic hydrology and its use in water resources systems simulation and optimization**. Amsterdam: Kluwer Academic Publishers, 1993. p.217-220.
- VELGHE, T.; TROCH, P.A.; DE TROCH, F.P. et al. Evaluation of cluster-based rectangular pulses point process models for rainfall. **Water Resources Research**, Saint Louis, v.30, n.10, p.2847-2857, 1994.
- WAYMIRE, E.; GUPTA, V.K. The mathematical structure of rainfall representations 1. A Review of the stochastic rainfall models. **Water Resources Research**, Saint Louis, v.17, n.5, p.1261-1272, 1981.
- WHEATER, H.S.; ISHAM, V.S.; COX, D.R. et al. Spatial-temporal rainfall fields: modelling and statistical aspects. **Hydrology and Earth System Sciences**, Kathenbug-Lindau, v.4, p.581-601, 2000.