

CADEIAS DE MARKOV PARA MODELAGEM DIÁRIA DA OCORRÊNCIA DE VAZÕES CONSIDERANDO A SAZONALIDADE MENSAL: UM ESTUDO DE CASO NO RIO PIANCÓ

Samira Pinho Bezerra¹; Katherine da Silva Sousa²; Camilo Allyson Simões de Farias³

1 Graduando em Eng. Ambiental, UFCG, Pombal-PB. samirapinhob@gmail.com

2 Mestranda em Sistemas Agroindustriais, UFCG, Pombal-PB. katherinesousasilva@hotmail.com

3 Prof. Adjunto IV, D. Eng., UFCG, Pombal-PB. Fone: (83) 3431-4002. camilo@ccta.ufcg.edu.br

INTRODUÇÃO:

Um dos principais focos da hidrologia é a representação de processos hidrológicos em uma bacia hidrográfica. Para isto, é comumente necessário o uso de modelos para descrever o comportamento das variáveis que fazem parte do ciclo hidrológico, tais como precipitação, vazão, e evapotranspiração, levando-se em conta as características fisiográficas inerentes à bacia. Existe uma ampla variedade de modelos que podem ser utilizados para estimativa de variáveis hidrológicas, os quais podem ser classificados em duas grandes categorias: determinísticos e probabilísticos. Esta última, objeto deste estudo, é também conhecida como modelagem estocástica (Bayer e Castro, 2012).

A região semiárida do nordeste brasileiro manifesta um balanço hídrico desfavorável, tendo em vista os relatos de déficit hídrico em quase todo território. Desse modo, uma localidade suscetível em que a irregularidade de precipitações anuais pode chegar a condições extremas retratadas por sucessivos e prolongados períodos de estiagem, que são o principal impacto da instabilidade climática na região. As demandas tanto em termos de quantidade (escassez e excesso) como de qualidade da água são agravadas pela falta de estratégias adequadas de gerenciamento dos recursos hídricos (Marengo, 2008; Farias, 2009).

Considerando que séries históricas de registros hidrológicos nem sempre estão disponíveis ou são incompletas, utiliza-se desses modelos para suprir tal deficiência. A justificativa para empregar tais modelos é ainda mais forte quando o interesse está em avaliar o desempenho de sistemas hídricos quando da ocorrência de eventos extremos, como uma sequência de anos secos. Como é o caso do rio Piancó que além de ser intermitente, apresenta séries históricas deficientes ocasionando um atraso em modelos probabilísticos de vazão satisfatórios. (Thyer e Kuczera, 2000; Loucks et al. 2005).

Denomina-se processo de Markov qualquer fenômeno que possa ser classificado em estados finitos e discretos, e cuja probabilidade de transição entre tais estados, num intervalo de tempo também discreto, dependa apenas do estado corrente e do estado seguinte. A sequência de estados seguindo este processo é chamada de cadeia de Markov (Shamblin, 1979).

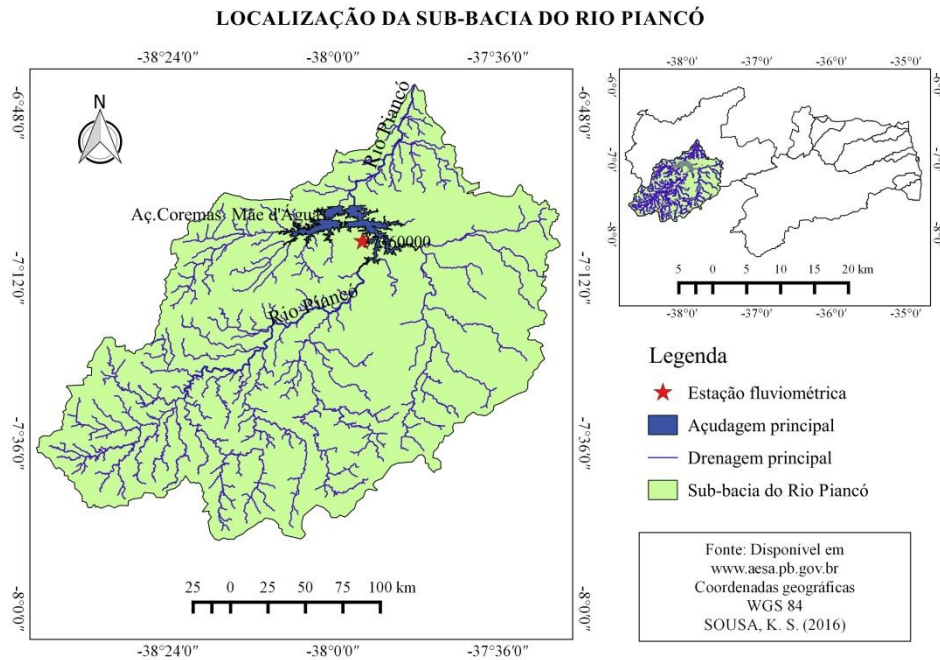
Neste contexto, um modelo probabilístico baseado em cadeias de Markov que permite configurar as variáveis randômicas estão definidas em um espaço de estados discreto é proposto e aplicado para estimar a ocorrência de vazões diárias considerando os parâmetros calibrados na sazonalidade mensal no trecho intermitente do rio Piancó, a fim de comparar a eficiência do método entre as estimativas mensal realizada neste estudo e diárias de acordo com Bezerra et al., 2015.

MATERIAIS E MÉTODOS:

A estimativa de ocorrência das vazões compreende as séries hidrológicas do rio Piáncó, localizado no semiárido paraibano, cuja bacia hidrográfica pertence à bacia do rio Piranhas-

Açu. Inserida na mesorregião do sertão paraibano e localizada no sudoeste da Paraíba, território este, possuindo 9.242,76 km² e um total de 271.255 habitantes, conforme mostrado na Figura 1. A região objeto de estudo apresenta clima semiárido e valores anuais médios de precipitação e temperatura de 821 mm e 24°C, respectivamente (Lima, 2004).

Figura 1. Localização da área de estudo e posto fluviométrico utilizado.

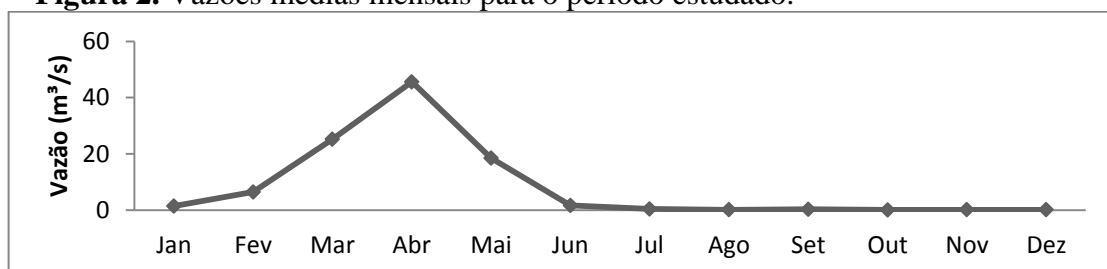


Por meio do sítio eletrônico HidroWeb, pertencente a Agência Nacional de Águas (ANA, 2014), foram adquiridos os dados utilizados. As informações obtidas evidenciam nove anos de coletas diárias, mesmos dados utilizados por Bezerra et al. (2015). A escolha destes dados de ocorrência de vazões para geração dos modelos foi conduzida conforme Lourenço (2012), optando-se por excluir anos que apresentassem falhas de leituras ou suspeita de leituras errôneas e/ou de problemas no sistema de banco de dados. Na Tabela 1 constam o posto e período de dados utilizados neste trabalho. Na Figura 2, é possível observar as vazões mensais médias analisadas.

Tabela 1. Dados do posto utilizado.

CÓDIGO	NOME DO POSTO	TIPO	ANOS
37340000	Piancó	Fluviométrico	1966, 1967, 1972, 1973, 1976, 1978, 1979, 1982, 1987.

Figura 2. Vazões médias mensais para o período estudado.



Os dados analisados configuram este processo estocástico como uma Cadeia de Markov. Processo este, definido como ordenações de probabilidades para etapas futuras que baseiam – se unicamente na condição atual, desprezando a trajetória do processo para o estado atual. A análise consiste na ocorrência de vazões que atribui ao episódio X de vazão molhado ou seco, onde ocorrido no local p e mês t , de forma que:

$$X_t(p) = \begin{cases} 0, & \text{para mês } t \text{ seco} \\ 1, & \text{para mês } t \text{ molhado} \end{cases} \quad (1)$$

De acordo com Bezerra et al. (2015), a construção da cadeia de Markov se inicia com as probabilidades de transição, cuja representação pode ser interpretada como $p_{01}(u)$, determinando um dia seco seguido de um dia molhado, e $p_{11}(u)$, indicando um dia molhado seguido de outro também molhado. Utilizando-se das probabilidades de transição condicionais complementares o processo é concluído. Por meio das equações (2)-(5), as probabilidades de transição podem ser calculadas.

$$\Pr\{X_t(u) = 1 | X_{t-1}(u) = 0\} = p_{01}(u) \quad (2)$$

$$\Pr\{X_t(u) = 1 | X_{t-1}(u) = 1\} = p_{11}(u) \quad (3)$$

$$p_{00}(u) = 1 - p_{01}(u) \quad (4)$$

$$p_{10}(u) = 1 - p_{11}(u) \quad (5)$$

Portanto, uma matriz de transição \mathbf{M} do processo de Markov de primeira ordem e dois estados, ou seja, somente os dias atual e anterior são levados em consideração. Desse modo, foram calculadas matrizes de probabilidades para cada mês do ano, definida como:

$$\mathbf{M} = \begin{vmatrix} p_{00} & p_{01} \\ p_{10} & p_{11} \end{vmatrix} \quad (6)$$

As probabilidades associadas à condição do dia corrente, consideradas com base em um critério de seleção, depois de gerado um número aleatório proveniente de uma distribuição de probabilidade uniforme, estimam a ocorrência ou não da vazão no mês seguinte, simulando, portanto a cadeia de Markov. Os modelos de Markov desenvolvidos em linha de programação computacional por meio do programa MatLab (2015) permitiram relacionar as vazões em organização matricial.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram utilizados os nove anos (1966, 1967, 1972, 1973, 1976, 1978, 1979, 1982 e 1987) na calibração do modelo para a obtenção das 12 matrizes de transição que representam os meses dos anos estudados. O teste foi realizado em todo o período. As matrizes de transição para cada mês do ano representaram de forma satisfatória a sazonalidade do rio estudado apresentados conforme a Tabela 2.

O desempenho do modelo foi analisado por meio de um critério de porcentagens de acertos, que é conseguido com a divisão da quantidade de acertos pela quantidade total das estimativas. Por se tratar de um modelo probabilístico, para avaliar a calibração e testar o modelo, foram conduzidas 100 diferentes simulações. Na Tabela 3 são apresentados os valores mínimos, médios e máximos dos percentuais de acertos obtidos considerando as 100 simulações do modelo de Markov para os dados de calibração e teste.

Tabela 2. Valores para pdd (p00), pdw(p01), pwd(p10) e pww(p11) para as 12 matrizes de transição.

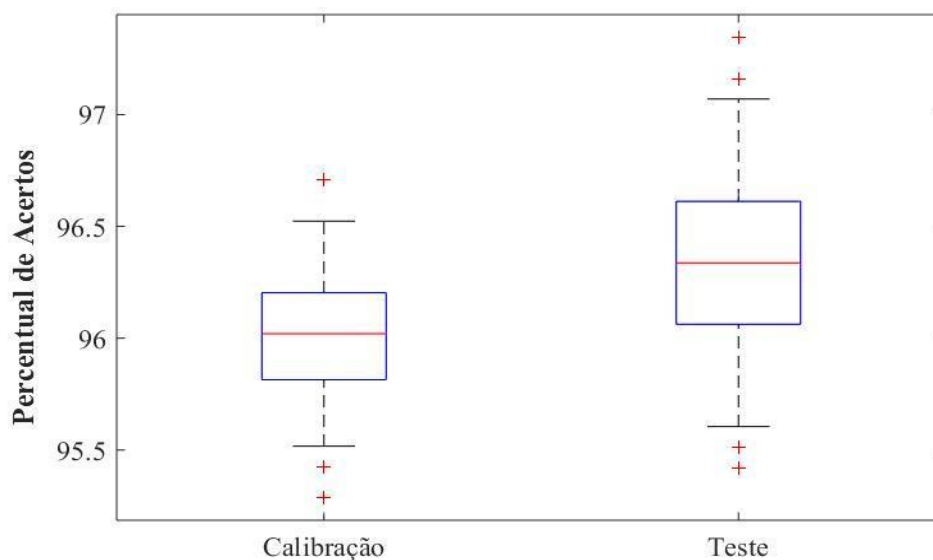
MESES	ESTADOS DE TRANSIÇÃO			
	Pdd	Pdw	Pwd	Pww
JAN	0,9626	0,0374	0,0685	0,9315
FEV	0,7059	0,2941	0,0204	0,9796
MAR	0	1,0000	0	1,0000
ABR	0	1,0000	0	1,0000
MAI	0	1,0000	0,0056	0,9944
JUN	1,0000	0	0,0062	0,9938
JUL	0,9623	0,0377	0,0315	0,9685
AGO	0,9917	0,0083	0,0667	0,9333
SET	0,9938	0,0063	0,1429	0,8571
OUT	0,9936	0,0064	0,0417	0,9583
NOV	0,9934	0,0066	0,0435	0,9565
DEZ	0,9742	0,0258	0,1200	0,8800

Tabela 3. Resultados obtidos com modelo de Markov para os dados de calibração e teste.

Conjunto de Dados	Acertos (%)		
	Mínimo	Média	Máxima
Calibração	95,26	96,15	96,48
Teste	95,86	96,24	97,12

Na Figura 3 é apresentado o gráfico *boxplot* do percentual de acertos do modelo tanto para o período de calibração como para o período de testes. Ao avaliar os resultados para o conjunto de testes, constatou-se que os percentuais de acertos em 100% das simulações foram iguais ou superiores a 95,86%, sendo que em mais de 75% das simulações obtive-se percentual de acertos superior a 96%.

Figura 3. *Boxplot* do percentual de acertos para os dados de calibração e teste considerando 100 diferentes simulações.



Ao observar os resultados apresentados na Tabela 3 e Figura 3, compreende-se que as estimativas de ocorrência são consideradas favoráveis para os dados de calibração e também para os dados de testes. Comparando com os resultados de Bezerra et al. (2015) e levando em consideração que neste estudo utilizamos uma matriz de transição para cada mês obtivemos resultados similares, porém um pouco superiores o que torna o modelo utilizável, conforme mostra a Tabela 4.

Tabela 4. Desempenho comparativo nos períodos de calibração e teste dos modelos.

Conjunto de Dados	Acertos (%)					
	Estimativa Mensal			Bezerra et al.(2015)		
	Mínimo	Média	Máxima	Mínimo	Média	Máxima
Calibração	95,26	96,15	96,48	94,69	95,56	96,43
Teste	95,86	96,24	97,12	94,96	96,42	97,25

CONCLUSÕES

Tendo como objetivo à estimativa da ocorrência de vazões diárias considerando características sazonais (mensais) do rio Piancó, localizado no sertão paraibano. E com a tentativa de melhorar o modelo de estimativa de ocorrência de vazões diárias proposto por Bezerra et al. (2015). Foram consideradas matrizes de transição com parâmetros mensais. Utilizando-se das cadeias de Markov, desenvolve-se um modelo probabilístico para estimar a ocorrência ou não de vazão, com base no estado do mês anterior. Por meio dos resultados, observou-se que a consideração de parâmetros sazonais não trouxe mudanças significativas nas estimativas obtidas com apenas uma matriz de transição, conforme proposto por Bezerra et al. (2015) para o rio Piancó e para o período de tempo estudado, porém consideradas promissoras tornando o modelo exequível.

REFERÊNCIAS

Aksoy, H. (2000). "Use of Gamma Distribution in Hydrological Analysis". Turk J Engin Environ Sci, 24, 419–428.

ANA – Agência Nacional de Águas. Disponível em <http://hidroweb.ana.gov.br/>, acessado em 27/11/2014.

Bayer, D. M., E Castro, N. M. Dos R. (2012). Modelagem e Previsão de Vazões Médias Mensais do Rio Potiribu Utilizando Modelos de Séries Temporais. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 17(2), 229–239p.

Bezerra, U. A.; Farias, C. A. S.; Silva Filho, J. A. Cadeias de MARKOV para estimativa diária de ocorrência de vazões no rio Piancó. In: 72º Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia, 2015, Fortaleza-CE. Anais do 72º Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia. 2015.

Farias, C. A. S. "Derivation of hedging rules and forecasts by artificial neural networks for optimal real-time management of an integrated water resources system". Tese de Doutorado, Ehime University, Matsuyama – Japão, 127 p. 2009.

Loucks, D. P., Beek, E. Van, Stedinger, J. R., Dijkman, J. P. M., & Villars, M. T. (2005). Concepts in Probability , Statistics and Stochastic Modelling. In: Water Resources Systems Planning and Management: An Introduction to Methods, Models and Applications (Studies an., pp. 168–229). WL - Delft Hydraulics, The Netherlands: UNESCO Publishing.

Lourenço, A. M. G. “Modelos Chuva-Vazão baseados em Redes Neurais Artificiais para Rios Intermitentes no Semiárido Paraíbano”. Monografia – Universidade Federal de Campina Grande, 46 p. 2012.

Marengo, Jose A. (2008). "Vulnerabilidade , impactos e adaptação à mudança do clima no semi-árido do Brasil". Parcerias Estratégicas, 27,149-176p.

Shamblin, J. E. Pesquisa Operacional: uma abordagem básica. São Paulo: Atlas,1979.

Thyer, M., E Kuczera, G. (2000). Modeling long-term persistence in hydroclimatic time series using a hidden state Markov model. Water Resources Research, 36(11), 3301–3310.