



GRUPO VERDE DE AGROECOLOGIA E ABELHA

Aplicação do Tank Model para estimativa mensal de vazões na bacia hidrográfica do rio Piancó

Application of the Tank Model for estimating monthly stream flows in piancó river basin

Francisco Miquéias Sousa Nunes¹; Camilo Allyson Simões de Farias²; Wanessa Alves Martins³; Rosângela Nóbrega Almeida⁴; José Cleidimário Araújo Leite⁵

RESUMO – Uma modelagem hidrológica via *Tank Model* foi conduzida com o objetivo de estimar vazões mensais em um trecho do rio Piancó, que está localizado no estado da Paraíba. Para calibração e validação do modelo, utilizaram-se dados de chuva, evaporação potencial e vazões médias mensais do período compreendido entre 1964 à 1988. Os parâmetros do modelo foram calibrados automaticamente por meio de algoritmos genéticos e a sua eficácia foi verificada considerando-se como critérios os coeficientes de *Nash-Sutcliffe*, de correlação e o viés relativo. A partir dos resultados, conclui-se que foi possível representar o escoamento das águas na bacia do rio Piancó, assim como obter estimativas de vazões consideradas aceitáveis. Espera-se que esse estudo possa contribuir para o manejo adequado das águas na bacia hidrográfica do rio Piancó.

Palavras chave: Modelo chuva-vazão, algoritmos genéticos, semiárido.

ABSTRACT – A hydrological modelling using the *Tank Model* was conducted in order to estimate monthly stream flows in a stretch of *Piancó* river, which is located in *Paraíba* State, Brazil. In order to calibrate and validate the *Tank Model*, we used rainfall, potential evaporation and stream flows data from 1964 to 1988. The model parameters were automatically calibrated by using genetic algorithms and its effectiveness was verified considering as criteria the coefficients of *Nash-Sutcliffe*, correlation and relative bias. Based on the results, we conclude that it was possible to represent the water flow in *Piancó* river basin as well as to obtain acceptable stream flow estimates. This study may contribute as a support for the water resources management in *Piancó* river basin.

Keywords: Rainfall-runoff model, genetic algorithms, semiarid.

*Autor para correspondência

Recebido em 09/01/2014 e aceito em 30/03/2014

¹ Graduado em Engenharia Ambiental, Unidade Acadêmica de Ciências e Tecnologia Ambiental - CCTA/UFCG, *Campus* de Pombal – PB, Rua Jário Vieira Feitosa, n.º 1770, Bairro dos Pereiros, CEP: 58.840.000. E-mail: miqueias2103_@hotmail.com

² D. Eng., Professor Adjunto III, Unidade Acadêmica de Ciências e Tecnologia Ambiental - CCTA/UFCG, *Campus* de Pombal – PB, Rua Jário Vieira Feitosa, n.º 1770, Bairro dos Pereiros, CEP: 58.840.000. E-mail: camilo@ccta.ufcg.edu.br

³ Graduada em Engenharia Ambiental, Unidade Acadêmica de Ciências e Tecnologia Ambiental - CCTA/UFCG, *Campus* de Pombal – PB, Rua Jário Vieira Feitosa, n.º 1770, Bairro dos Pereiros, CEP: 58.840.000. E-mail: wanessa_ufcg@hotmail.com

⁴ Graduada em Engenharia Ambiental, Unidade Acadêmica de Ciências e Tecnologia Ambiental - CCTA/UFCG, *Campus* de Pombal – PB, Rua Jário Vieira Feitosa, n.º 1770, Bairro dos Pereiros, CEP: 58.840.000. E-mail: rosangela_ufcg@hotmail.com

⁵ D. Eng., Professor Adjunto III, Unidade Acadêmica de Ciências e Tecnologia Ambiental - CCTA/UFCG, *Campus* de Pombal – PB, Rua Jário Vieira Feitosa, n.º 1770, Bairro dos Pereiros, CEP: 58.840.000. E-mail: cleidimario@ccta.ufcg.edu.br

INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural necessário para a realização de várias atividades fundamentais à manutenção e sobrevivência humana, tais como: abastecimento, produção de alimentos, geração de energia, transporte, lazer, equilíbrio e manutenção de ecossistemas. (LIMA, 2001).

Como consequência de sua extensão continental, o Brasil é um país que tem características hidrológicas, geológicas e climáticas diversas (REIS, 2014). Segundo Carneiro & Farias (2013), no semiárido nordestino, as altas taxas de evaporação, baixa pluviometria e distribuição irregular de chuvas no espaço e tempo são as características predominantes. Além disso, conforme descreve Lima (2004), essa região é carente em água subterrânea, uma vez que a sua geologia é basicamente composta por formações cristalinas.

Os modelos chuva-vazão são normalmente usados para determinar a vazão de um rio a partir da precipitação a que a bacia hidrográfica está submetida. Assim, o modelo de vazão precisa ter como entrada o montante precipitado na bacia em um intervalo de tempo ou uma estimativa desse volume. O valor representativo dessa chuva, denominado como precipitação média, pode ser calculado pelo quociente entre o volume total precipitado e a área total da bacia de contribuição (MENDES et al., 2007).

O modelo hidrológico *Tank Model*, classificado como determinístico, conceitual e de multicomponentes, foi desenvolvido por Sugawara (1979). De acordo com Soares Júnior et al. (2009), o *Tank Model* é descrito como um sistema de vazões com armazenamento, constituído por uma série de tanques. De forma geral, um conjunto de tanques é usado para representar a bacia hidrográfica e a quantidade de água escoada de cada tanque é definida como sendo proporcional à altura da água a partir do arranjo de descarga e/ou infiltração. O armazenamento da bacia é definido como sendo a profundidade do tanque.

Lara & Kobiyama (2012) afirmam que o *Tank Model* pode ser usado para simular o balanço hídrico de uma bacia hidrográfica por meio de uma série de tanques, em que a quantidade de água guardada no primeiro tanque é determinada pela chuva e o armazenamento nos demais tanques pela infiltração do tanque superior.

Ainda que o *Tank Model* seja simples, há problemas para se fazer a sua calibração em virtude da arbitrariedade na obtenção dos parâmetros de ajuste. Devido a isso, há um elevado grau de incerteza vinculado ao ajuste desse modelo. Ajustes aceitáveis dependem da habilidade do modelador e/ou de técnicas de autocalibração (LARA & KOBİYAMA, 2012).

Devido ao aumento de situações de estresse hídrico, tem-se percebido a existência de potenciais conflitos pelo uso da água na bacia do rio Piancó, estado da Paraíba. Com isso, é imprescindível a necessidade de estudos sobre as disponibilidades hídricas nessa região. Nesse estudo, objetiva-se calibrar e verificar a

aplicabilidade do *Tank Model* para estimativa de vazões mensais no rio Piancó, a fim de que se possa alcançar um melhor entendimento sobre o potencial de uso de suas águas.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo de caso compreende parte da bacia hidrográfica do rio Piancó, uma sub-bacia pertencente à bacia do rio Piancó-Piranha-Açu, que abrange os estados da Paraíba e Rio Grande do Norte (PERH/PB, 2006).

Devido à predominância de solos compostos por formações cristalinas, a região do rio Piancó é carente em água subterrânea. Com uma temperatura média igual a 26°C, nesta bacia observam-se precipitações médias anuais iguais a 821 mm, sendo que cerca de 60% das chuvas concentram-se nos meses de fevereiro a abril. A evaporação potencial média anual é de aproximadamente 2300 mm, sendo mais intensa entre os meses de setembro e dezembro (LIMA, 2004).

Na TAB. 1 apresentam-se as principais características fisiográficas da bacia do rio Piancó.

Tabela 1: Características da bacia do rio Piancó.

Área de drenagem	9.232,50 km ²
Coefficiente de Compacidade	1,63
Densidade de Drenagem	0,43 km/km ²
Fator de Forma	0,39
Perímetro	560,50 km

Fonte: Lourenço (2012)

Na bacia do rio Piancó existem cerca de 1.336 reservatórios, dos quais 90,6% são considerados açudes de pequeno porte (SCIENTEC, 1997). Os açudes Coremas e Mãe D'água encontram-se na bacia do rio Piancó e juntos se tornam a maior reserva hídrica do estado da Paraíba, com uma capacidade de 1.358.000 m³. Na FIG.1 encontra-se um mapa com a localização da bacia hidrográfica do rio Piancó e dos postos hidrológicos usados nesse estudo.

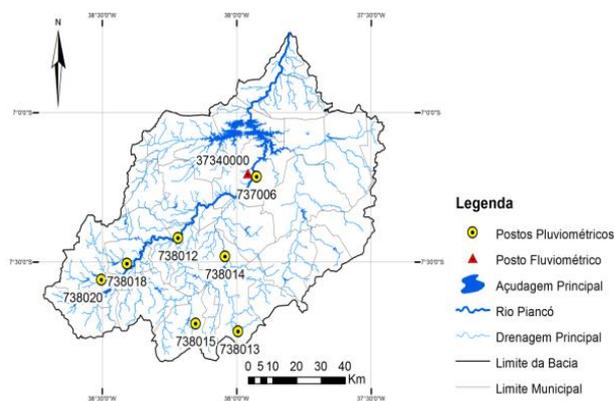


Figura 1: Localização da bacia do rio Piancó.

Fonte: Lourenço (2012).

Tank Model

A modelagem com o *Tank Model* se caracteriza por apresentar uma estrutura simples e de fácil implementação, além de ser a mais indicada para análise de períodos longos, como os intervalos mensais. Esse tipo de modelo é muito usado no Japão (MENDES et al., 2007).

Nesse estudo, o modelo para a discretização de tempo mensal foi implementado com quatro tanques, conforme ilustrado na FIG. 2.

Os parâmetros a serem otimizados são os coeficientes para vazões, a_1 , a_2 , a_3 , a_4 e a_5 ; os coeficientes para infiltrações, b_1 , b_2 e b_3 ; e as alturas dos bocais nos tanques, h_1 , h_2 , h_3 e h_4 .

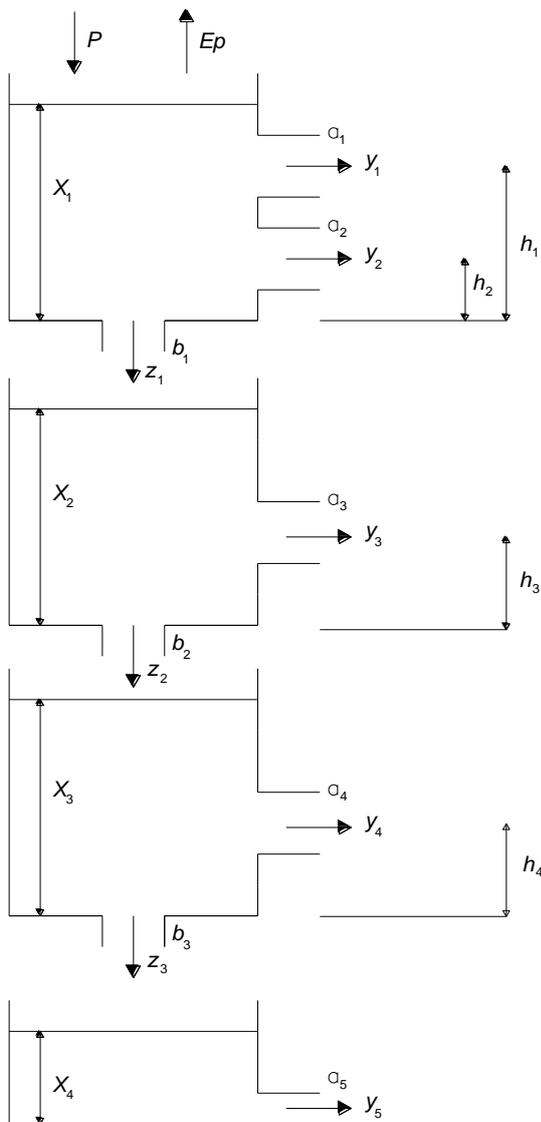


Figura 2: Estrutura do *Tank Model*.

Fonte: Autoria própria (2014).

Os escoamentos e infiltrações são definidos como proporções das profundidades de armazenamento nos tanques. A transferência de água entre os tanques é determinada por meio de equações de balanço hídrico. Dessa forma, o *Tank Model* é estabelecido a partir das equações (1) – (13):

$$y_1(i) = a_1 \cdot [X_1(i) - h_1] \quad (1)$$

$$y_2(i) = a_2 \cdot [X_1(i) - h_2] \quad (2)$$

$$y_3(i) = a_3 \cdot [X_2(i) - h_3] \quad (3)$$

$$y_4(i) = a_4 \cdot [X_3(i) - h_4] \quad (4)$$

$$y_5(i) = a_5 \cdot X_5(i) \quad (5)$$

$$z_1(i) = b_1 \cdot X_1(i) \quad (6)$$

$$z_2(i) = b_2 \cdot X_2(i) \quad (7)$$

$$z_3(i) = b_3 \cdot X_3(i) \quad (8)$$

$$X_1(i) = \max [X_1(i-1) + P(i) - Ep(i) - y_1(i) - y_2(i) - z_1(i); 0] \quad (9)$$

$$X_2(i) = X_2(i-1) + z_1(i) - y_3(i) - z_2(i) \quad (10)$$

$$X_3(i) = X_3(i-1) + z_2(i) - y_4(i) - z_3(i) \quad (11)$$

$$X_4(i) = X_4(i-1) + z_3(i) - y_5(i) \quad (12)$$

$$Q(i) = \frac{[y_1(i) + y_2(i) + y_3(i) + y_4(i) + y_5(i)] \cdot A_d}{2630} \quad (13)$$

em que $y_1(i)$, $y_2(i)$ e $y_3(i)$ são as lâminas de vazão no mês i , em mm; $z_1(i)$, $z_2(i)$ e $z_3(i)$ são os valores de infiltração em cada tanque no mês i , em mm; $X_1(i)$, $X_2(i)$, $X_3(i)$ e $X_4(i)$ são as profundidades de armazenamento no mês i , em mm; $Q(i)$ é a vazão no mês i , em m³/s; e $P(i)$ é a precipitação no mês i , em mm; $Ep(i)$ é a evaporação potencial na bacia no mês i , em mm; e A_d é a área de drenagem da bacia, em km².

O procedimento de calibração tem como objetivo encontrar um conjunto ótimo de valores para os parâmetros a_1 , a_2 , a_3 , a_4 , a_5 , b_1 , b_2 , b_3 , h_1 , h_2 , h_3 e h_4 .

O *Tank Model* foi implementado em MATLAB R2012a.

Calibração do *Tank Model*

Para esse estudo, foram usados dados de oito postos hidrológicos localizados na bacia do rio Piancó, sendo um fluviométrico e sete pluviométricos. Os dados foram coletados a partir do *website HidroWeb*, pertencente à Agência Nacional das Águas (ANA, 2014), e junto à Agência Executiva de Gestão das Águas do estado da Paraíba (AESAs, 2014). Os dados de evaporação potencial foram adquiridos a partir do Plano Diretor de Recursos Hídricos do Estado da Paraíba (SCIENTEC, 1997). Na TAB. 2 encontram-se os postos hidrológicos utilizados e seus respectivos códigos de localização.

Tabela 2: Postos e códigos de localização.

Tipo	Nome	Código
Pluviométrico	Conceição	738020
	Ibiara	738018
	Nova Olinda	738014
	Princesa Isabel	738013
	Piancó	737006
	Boa Ventura	738012
	Manaíra	738015
Fluviométrico	Piancó	37340000

Fonte: Autoria própria (2014)

Para calibração e validação dos modelos, utilizaram-se dados de chuva média, vazão e evaporação potencial de outubro de 1964 a dezembro de 1984 e de janeiro de 1985 a dezembro de 1988, respectivamente. Para os dados de chuva, consideraram-se as médias aritméticas referentes aos dados dos sete postos pluviométricos disponíveis.

O mês inicial do conjunto de dados de calibração foi prudentemente escolhido em uma estação seca, em que não houve vazão no rio Piancó, permitindo assumir os volumes iniciais nos tanques como sendo iguais a zero.

Os parâmetros do *Tank Model* foram calibrados automaticamente por meio de algoritmos genéticos (AG), considerando-se a maximização do coeficiente de *NASH* (Nash & Sutcliffe, 1970), dado pela Equação (14).

$$NASH = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N [Q_{obs}(i) - Q_{cal}(i)]^2}{\sum_{i=1}^N [Q_{obs}(i) - \bar{Q}_{obs}]^2} \quad (14)$$

em que $Q_{obs}(i)$ é a vazão observada no mês i ; $Q_{cal}(i)$ é a vazão calculada pelo *Tank Model* no mês i ; \bar{Q}_{obs} é a vazão média observada no período.

Os AGs são modelos fundamentados na estrutura de seleção natural de Charles Darwin (GOLDBERG, 1989). Nesse estudo, utilizou-se o modelo de algoritmo genético que faz parte do *Global Optimization Toolbox* do MATLAB R2012a.

O processo de calibração dos parâmetros foi conduzido por 10 vezes com o intuito de se diminuir as chances das soluções serem mínimos locais. A população inicial, fixa durante as gerações, foi estabelecida como igual a 100 indivíduos para cada AG desenvolvido. A estratégia de elitismo foi adotada em 2% da população para evitar a perda das melhores soluções. As soluções remanescentes foram sujeitas a transformações do tipo *crossover* e mutação, com frações de 80% e 20% da

população, respectivamente. Cada calibração tinha como limite de parada o número máximo de 100 gerações.

A eficácia de modelos hidrológicos é normalmente avaliada por meio de índices estatísticos. Nesse estudo foram usados os índices de correlação (R), viés relativo (VR) e coeficiente de *NASH*. A correlação avalia o grau de dependência linear entre as estimativas e observações, sendo uma medida de erro randômico. Já o viés relativo é uma medida de erro sistemático em que se indica uma tendência de subestimação ou superestimação da estimativa. O coeficiente de *NASH* é um coeficiente em que se expressa a aderência entre valores calculados e observados, considerando tanto erros sistemáticos como randômicos. As equações para os cálculos desses coeficientes podem ser encontradas no trabalho de Lettenmaier & Wood (1993).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na TAB. 3 encontram-se os resultados da calibração dos parâmetros do *Tank Model*.

Ao investigar os parâmetros calibrados do *Tank Model*, verifica-se que o coeficiente b_1 foi igual a zero, indicando que não há transferência de água do primeiro para o segundo tanque e que, portanto, os escoamentos ocorrem somente por meio dos bocais representados pelos fluxos y_1 e y_2 . Dessa informação, extrai-se que, no intervalo de tempo mensal, é necessário apenas um tanque para representar o escoamento de água na bacia do rio Piancó e que o mesmo é basicamente superficial. Esse resultado é coerente com as descrições encontradas nos trabalhos de Lima (2004) e Carneiro & Farias (2013), em que afirmam que na bacia do rio Piancó há predominância de uma geologia com formações cristalinas e baixa disponibilidade de água subterrânea.

Na TAB. 4 é possível observar os resultados das métricas de avaliação para calibração e validação do *Tank Model*. Nas FIGS 3 e 4 encontram-se os hidrogramas com valores calculados e observados para os períodos de calibração e validação.

Segundo Collischonn (2001), considera-se um modelo hidrológico como eficaz quando o valor de *NASH* entre valores calculados e observados for superior a 0,75. Caso o *NASH* fique entre 0,36 e 0,75, o modelo é tido como aceitável. Como pode ser visto na TAB. 4, os valores de *NASH* da calibração e validação foram iguais a 0,60 e 0,45, respectivamente, o que indica que esses foram aceitáveis.

Tabela 3: Parâmetros calibrados do *Tank Model*.

a_1	a_2	a_3	a_4	a_5	b_1	b_2	b_3	h_1	h_2	h_3	h_4
0,17	1,64	0,14	1,05	0,16	0,00	1,03	0,00	0,08	0,00	2,04	0,19

Fonte: Autoria própria (2014)

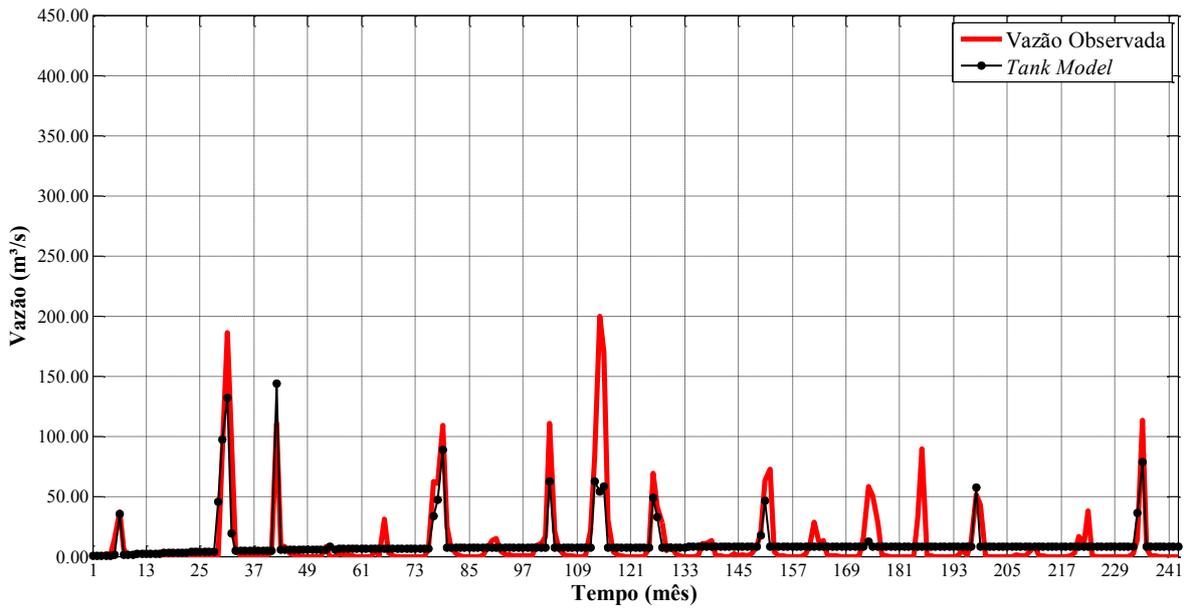


Figura 3: Hidrogramas de vazões observadas e calculadas para o conjunto de dados de calibração (10/1964 à 12/1984)
Fonte: Autoria própria (2014)

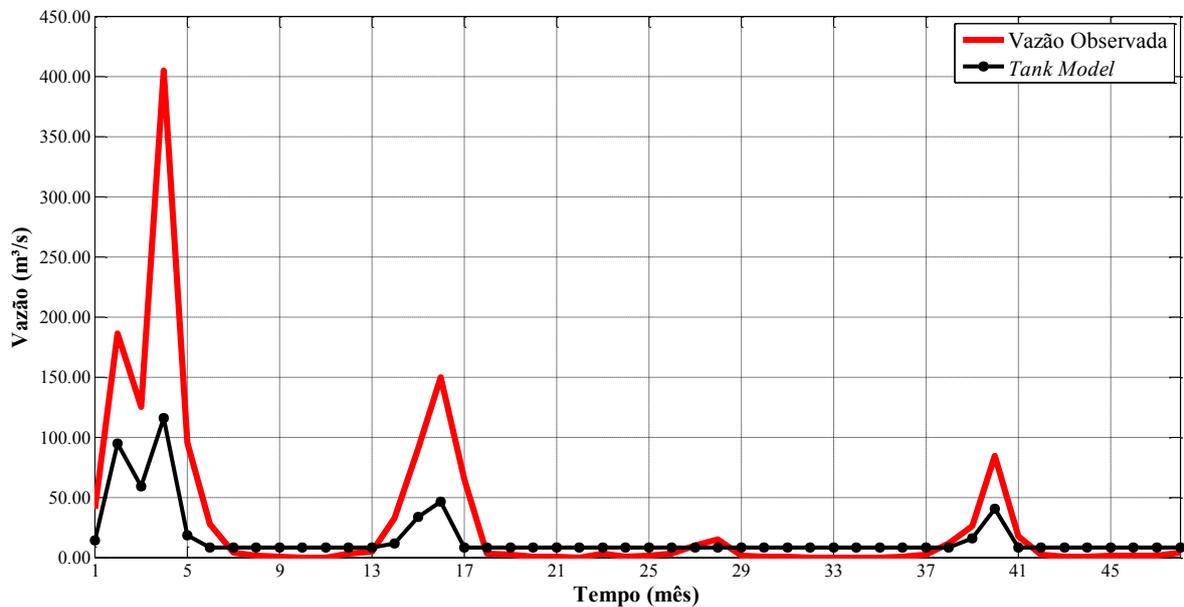


Figura 4: Hidrogramas de vazões observadas e calculadas para o conjunto de dados de validação (01/1985 à 12/1988).
Fonte: Autoria própria (2014)

Tabela 4: Resultados obtidos para o *Tank Model*.

Conjunto de dados	Índice	<i>Tank Model</i>
Calibração	<i>NASH</i>	0,60
	<i>R</i>	0,80
	<i>VR</i>	00,00%
Validação	<i>NASH</i>	0,45
	<i>R</i>	0,95
	<i>VR</i>	-47,55%

Fonte: Autoria própria (2014)

Os valores de *NASH* encontrados nessa pesquisa também encontraram-se na faixa dos valores obtidos por Lara & Kobiyama (2012), que, ao aplicarem um *Tank Model* para modelagem de eventos de chuva-vazão na bacia hidrográfica do *Campus* da Universidade Federal de Santa Catarina, observaram coeficientes *NASH* variando entre 0,41 e 0,85 para sete validações.

Os coeficientes de correlação se apresentaram altos tanto para calibração ($R = 0,80$) quanto para validação ($R = 0,95$).

Mendes et al. (2007) encontraram valor de correlação similar, igual a 0,89, na validação de um *Tank Model* para uma bacia hidrográfica no estado de Goiás e consideraram que o modelo conseguiu representar bem o comportamento das vazões na bacia estudada.

Ao averiguar a TAB. 4 e as FIGS 3 e 4, nota-se uma forte aderência entre as vazões calculadas e observadas, em especial nos picos dos hidrogramas. Em análise aos resultados de viés relativo para a calibração, percebe-se que não houve, em média, subestimação ou superestimação dos valores observados. Por outro lado, nos resultados para validação do modelo, houve uma subestimação considerável, chegando a -47,55%. Grande parcela dessa subestimação pode ser atribuída à dificuldade do modelo em alcançar o maior pico de vazão observado no conjunto de dados de validação (cerca de 400 m³/s), que foi praticamente igual ao dobro do maior pico de vazão observado nos dados de calibração (FIG. 3). Essa situação impôs ao modelo calibrado uma situação nova e, portanto, limitante. Espera-se que, com o aumento natural no número de dados de calibração ou até mesmo com o uso de modelos estatísticos para eliminação de vieses, seja possível melhorar a qualidade do modelo e, consequentemente, das previsões.

CONCLUSÃO

Uma modelagem hidrológica via *Tank Model* foi conduzida com o objetivo de estimar vazões mensais em um trecho do rio Piancó, que está localizado no estado da Paraíba. Com o propósito de verificar a eficácia do modelo proposto, compararam-se vazões simuladas com vazões observadas para um período de dados totalmente independente dos dados de calibração.

Apesar do modelo ser bastante simples, foi possível alcançar resultados aceitáveis e verificar que o *Tank Model* representa a bacia hidrográfica do rio Piancó de forma satisfatória. Observou-se, também, a possibilidade de evolução do modelo à medida que mais dados históricos fossem disponibilizados.

Por fim, espera-se que esse estudo sirva como suporte para promover o manejo adequado das águas da bacia do rio Piancó.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AESA - Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba. Disponível em <<http://www.aesa.pb.gov.br>>. 15 Maio. 2014.

ANA - Agência Nacional de Águas. Disponível em <<http://www.ana.gov.br>>. 15 Maio. 2014.

CARNEIRO, T. C.; FARIAS, C. A. S. **Otimização estocástica implícita e redes neurais artificiais para auxílio na operação mensal dos reservatórios Coremas - Mãe D'água**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 18, p. 115-124, 2013.

COLLISCHONN, W. **Simulação hidrológica em grandes bacias**. Tese (Doutorado) – UFRGS, Porto Alegre, 194p, 2001.

GOLDBERG, D. E. **Genetic algorithms in search, optimization, and machine learning**. Addison- Wesley, 1989.

LARA, P. G. DE; KOBAYAMA, M. **Proposta de Modelo Conceitual: PM Tank Model**. In: Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 17, n. 2003, p. 149-161, 2012.

LETTENMAIER D. P., WOOD, E. F. **Hydrologic Forecasting** in Handbook of Hydrology. Org. by Maidment, D. R., McGraw-Hill Inc., New York, USA, pp. 26.1-26.30, 1993.

LIMA, C. A. G. **Análise e sugestões para diretrizes de uso das disponibilidades hídricas superficiais da bacia hidrográfica do rio Piancó, situada no estado da Paraíba**. 2004. Tese (Programa de Doutorado em Recursos Naturais) – UFCG, Campina Grande-PB, 2004.

LIMA, J. E. F. W. **Recursos hídricos no Brasil e no mundo**. Ministério da agricultura, pecuária e abastecimento, Planaltina – DF, 2001.

LOURENÇO, A. M. G. **Modelo chuva-vazão baseado em redes neurais artificiais para Rios intermitentes no semiárido paraibano**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – UFCG, Pombal - PB, 2012.

MENDES, T. A.; VIEIRA, M. E. A.; FRANCO, C.; FORMIGA, T. M.; BARBALHO, F. D. **Aplicação do Tank Model na modelagem da bacia hidrográfica de flores de Goiás**. Anais do XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, São Paulo – SP, 2007.

NASH, J. E. AND J. V. SUTCLIFFE (1970), **River flow forecasting through conceptual models: part I - A discussion of principles**, *Journal of Hydrology*, 10 (3), 282-290.

PERH/PB. **Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado Paraíba**. 2006, Disponível em: www.aesa.pb.gov.br Acesso: 20 de maio de 2014.

REIS, C. Q. **Avaliação da sustentabilidade hídrica dos reservatórios engenheiro Ávida e São Gonçalo-PB**.

2014. Dissertação (Mestrado em sistemas Agroindustriais) – UFCG, Pombal - PB, p. 1–72, 2014.
- SCIENTEC – Associação para Desenvolvimento da Ciência e Tecnologia. **Plano Diretor de Recursos Hídricos do Estado da Paraíba**, 1997.
- SOARES JUNIOR, A.; FARIAS, C. A. S.; SANTOS, C. A. G.; SUZUKI, K. **Implementação de um algoritmo genético baseado em XML para a calibração do *Tank Model***. Anais do XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Campo Grande - MS, 2009.
- SUGAWARA, M. **Automatic Calibration of the *Tank Model***. Hydrological Science Bulletin, v 24, n 3, 1979.