
Modelagem do processo chuva-vazão na bacia hidrográfica do ribeirão Santa Bárbara em Goiás, Brasil

Rain-flow process modeling in the Santa Bárbara river basin in Goiás state, Brasil

Modelado del proceso de flujo de lluvia en la cuenca del río Santa Bárbara en Goiás, Brasil

Isabella Almeida Costa

Universidade Federal de Goiás
isabella.ac.agr@gmail.com

Michelle da Silva Honório

Universidade Federal de Goiás
honorio.michelle@hotmail.com

Resumo

A compreensão dos fluxos hídricos é parte essencial para a gestão dos recursos hídricos e os modelos hidrológicos estão apresentando-se cada vez mais necessários para este processo. Dentre as principais variáveis utilizadas para a aplicação nestes modelos, tem-se a precipitação, que é uma das que mais influenciam nas estimativas de vazão de uma bacia. Sendo assim, este estudo teve como objetivo verificar e comparar os resultados da validação e calibração ao aplicar a modelagem conceitual denominada como Tank Model, para representar o processo de chuva-vazão na bacia hidrográfica do Ribeirão Santa Bárbara na região sul do Estado de Goiás, empregando o algoritmo de Gradiente Reduzido Generalizado (GRG). Para isso, foi utilizada uma série histórica mensal de 10 anos sem falhas e aplicada a programação não-linear para definir os parâmetros do modelo. Para que fosse possível a comparação dos dados de vazão estimados com os observados das estações fluviométricas, utilizou-se o coeficiente de Nash-Sutcliffe (eNS). Os resultados representados pelos eNS obtidos foram considerados satisfatórios em termos de modelagem hidrológica, pois o modelo aplicado entregou coeficientes para a calibração de 0,875 e para a validação de 0,737. Já os coeficientes de correlação (R) se apresentaram altos, tanto para calibração ($R = 0,88$), quanto para validação ($R = 0,80$). Portanto, concluiu-se que devido à eficiência e simplicidade de entendimento, o modelo é satisfatório para essa região e pode ser

aplicado em locais menos favorecidos, com poucos dados disponíveis, para simulação confiável de estimativas de fluxos hidrológicos.

Palavras-chave: Modelagem hidrológica. Recursos Hídricos. Vazão estimada. Vazão observada.

Abstract

The comprehension on hydraulic fluids is a essential part for the water resources management, and the models hydrological are present increasingly necessary for this process. Among the main variables used to apply in these models, the precipitation is one of the most influential in the estimates of flow of a basin. Thus, this study aimed to verify and compare the validation and calibration results by applying the conceptual modeling called the Tank Model, to represent the rain-flow process in the Santa Bárbara stream basin in the southern region of the state of Goiás, Brazil, employing the Generalized Reduced Gradient (GRG) algorithm. For this, a monthly historical series of 10 years without fail was used and nonlinear programming was applied to define the parameters of the model. In order to be able to compare the estimated flow data with those observed from the fluviometric stations, the Nash-Sutcliffe coefficient (eNS) was used. The results represented by the eNS obtained were considered satisfactory in terms of hydrological modeling, because the applied model delivered coefficients for the calibration of 0.875 and for the validation of 0.737. Already the correlation coefficients (R) were high, both for calibration ($R = 0.88$) and validation ($R = 0.80$). Therefore, it was concluded that due to the efficiency and simplicity of understanding, the model is satisfactory for this region and can be applied in less favored places, with little data available, for reliable simulation of hydrological flow estimates.

Keywords: Hydrological modeling. Water resources. Estimated flow. Observed flow.

Resumen

La comprensión de las corrientes hídricas es parte esencial para la gestión de los recursos hídricos, y los modelos hidrológicos son cada vez más necesarios para este proceso. Entre las principales variables utilizadas para la aplicación en estos modelos, la precipitación es una de la más influyente en la estimación del flujo de una cuenca. Por lo tanto, este estudio tuvo como objetivo verificar y comparar los resultados de validación y calibración aplicando el modelo conceptual llamado Tank Model, para representar el proceso de flujo de lluvia en la cuenca del arroyo Santa Bárbara en la región sur del estado de Goiás, Brasil, empleando el algoritmo de gradiente reducido generalizado (GRG). Para esto, se utilizó una serie histórica mensual de 10 años sin fallas y se aplicó una programación no lineal para definir los parámetros del modelo. Para poder comparar los datos de flujo estimados con los observados desde las estaciones fluviométricas, se utilizó el coeficiente Nash-Sutcliffe (eNS). Los resultados representados por el eNS obtenido se consideraron satisfactorios en términos de modelación hidrológica, porque el modelo aplicado proporcionó coeficientes para la calibración de 0.875 y para la validación de 0.737. Los coeficientes de correlación (R) ya eran altos, tanto para la calibración ($R = 0,88$) como para la validación ($R = 0,80$). Por lo tanto, se concluyó que debido a su eficiencia y simplicidad de comprensión, el modelo es satisfactorio para esta región y se puede aplicar en lugares menos favorecidos, con pocos datos disponibles, para una simulación confiable de estimaciones de flujo hidrológico.

Palabras clave: Modelaje hidrológico. Recursos hídricos. Flujo estimado. Flujo observado.

Introdução

Modelos hidrológicos com os diversos aprimoramentos ao longo dos anos, tem se mostrado útil para aplicação em inúmeras áreas de gerenciamento de recursos hídricos, no que tange a estimativa de vazão em rios a partir de dados de precipitação, com ou sem preenchimento de falhas e alongamento de séries históricas, além de ser fundamental para previsão de cenários de planejamento. Modelos desse tipo são chamados de chuva-vazão e têm ganhado espaço em países como o Brasil, que apesar de possuírem uma rede de monitoramento fluviométrico os registros contêm falhas ou poucos períodos contínuos de medição (CELESTE; MENEZES; FONTES, 2014).

Os modelos hidrológicos foram se desenvolvendo ao longo dos anos e podem ser classificados sob os diferentes aspectos, geralmente se diferem pelas variáveis utilizadas no processo, podendo ser estocásticos ou determinísticos. Os primeiros procuram representar os processos físicos de transformação de chuva em vazão, enquanto os modelos estocásticos se baseiam na análise da estrutura de dependência temporal das séries de afluências (LUCAS *et al.*, 2009). A relação entre as variáveis também se dividem entre os modelos empíricos ou conceituais, na forma de representação dos dados podendo ser discreto ou contínuo, na forma das relações espaciais dividindo-se entre modelos concentrados ou distribuídos e por fim, a existência de dependência temporal que podem ser em modelos estacionários ou dinâmicos (ALMEIDA; SERRA, 2017).

Observa-se que nos modelos de chuva-vazão, o dado de precipitação é a variável mais importante para determinar a vazão em rios. Para modelos que contém essa finalidade, é de grande relevância que a entrada de informações seja a estimativa de volumes ou o montante precipitado por um período. A representação deste valor, denominada precipitação média, pode ser obtida pela divisão entre o volume e a área da bacia de contribuição (MENDES *et al.*, 2007).

Dentre tantas opções de modelos, destaca-se o Tank Model, um modelo determinístico e conceitual desenvolvido no Japão por Sugawara (1979). A ferramenta se resume em um conjunto de tanques que é usado para representar a bacia hidrográfica e a quantidade de água escoada de cada tanque, é definido como sendo proporcional à altura da água a partir do arranjo de descarga e/ou infiltração (NUNES

et al., 2014). Segundo Pereira *et al.* (2015-2016) trata-se de um modelo que tem sido amplamente empregado no estudo de cheias, preenchimento de falhas de séries hidrológicas e na avaliação das disponibilidades hídricas de bacias hidrográficas em países da Ásia, com ênfase no Japão.

No Brasil, verifica-se a aplicação do Tank Model em diversos estudos, como o desenvolvido por Celeste e Chaves (2014) onde aplicaram e compararam várias metodologias de otimização matemática para a calibração automática do Tank Model a fim de modelar o processo chuva-vazão na bacia hidrográfica do Rio Japarutuba, em Sergipe. Já Mendes *et al.* (2007) aplicaram o modelo chuva-vazão conceitual para a avaliação da vazão afluente ao barramento de Flores de Goiás.

Dado o exposto, este estudo teve como objetivo verificar e comparar os resultados da validação e calibração ao aplicar a modelagem conceitual do Tank Model, para representar o processo de chuva-vazão na bacia hidrográfica do Ribeirão Santa Bárbara na região sul do Estado de Goiás, empregando o algoritmo de Gradiente Reduzido Generalizado (GRG).

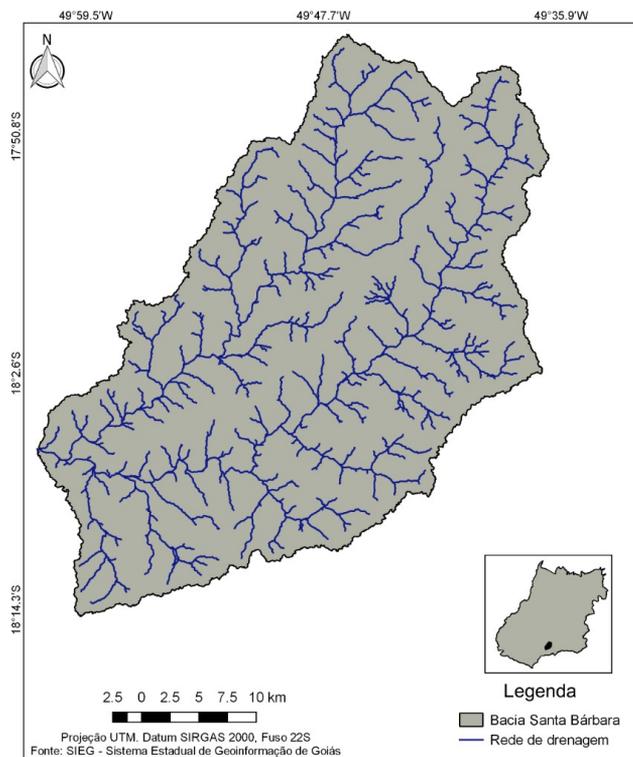
Material e método

Caracterização da área de estudo

O local do estudo é a sub-bacia do Ribeirão Santa Bárbara localizada no sul do Estado de Goiás e pertencente à Bacia Hidrográfica dos rios Turvo e dos Bois (Figura 1).

A sub-bacia compreende uma área de aproximadamente 1347,1 km² com perímetro de 290 km, seu limite está presente em quatro municípios goianos, são eles: Itumbiara, Goiatuba, Joviânia e Vicentinópolis. O Ribeirão Santa Bárbara é um dos afluentes do Rio dos Bois e possui cerca de 60,4 km de extensão. A bacia hidrográfica possui um clima predominantemente tropical semiúmido, com precipitação acumulada média de 1484,8mm com períodos de baixa precipitação, que compreendem os meses de abril a setembro e períodos mais chuvosos que situam entre outubro a março, com base nos registros de

1961 a 1990 (INMET, 2018). A média anual mínima e máxima das



temperaturas ficam entre 21 e 29 ° C, respectivamente.

Figura 1 – Sub-bacia do Ribeirão Santa Bárbara.

Fonte: Autores (2019).

Observa-se que o tipo de solo presente na região é do tipo latossolo. Esses solos são os de maior ocorrência no Brasil, sendo mais frequentes nas regiões equatoriais e tropicais, em sua maioria apresenta baixa fertilidade, possui acidez e teor de alumínio elevado. Entretanto, possui boas condições físicas para fins agrícolas, como por exemplo para produção de milho, soja, feijão arroz entre outros (EMBRAPA, 2018) (Figura 2a). A área da bacia hidrográfica é representada em mais de 74,97% por solo agricultável, representado cerca de 1.009,00 Km², conforme observado na Figura 2b, seguida de pastagem, com 13,78% distribuídos em 185,00 Km² e de vegetação nativa, cerca de 10,79%

numa área de 145,00 Km². Com menores proporções estão Solo Exposto, Urbanização, e Água, com 0,3%, 0,14% e 0,03%, respectivamente

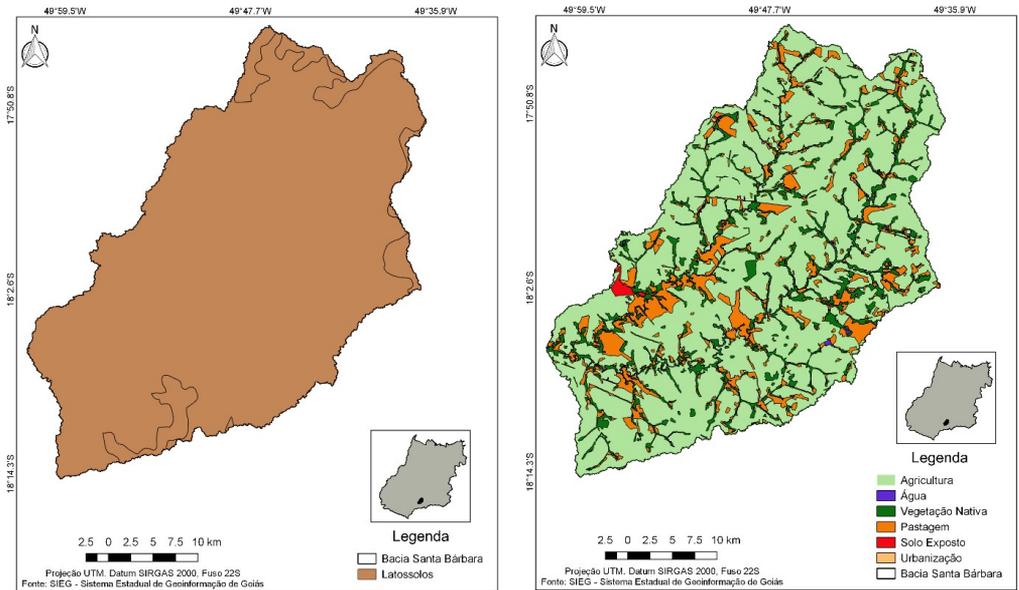


Figura 2 – a) Tipo de solo -b) uso e ocupação do solo presente na bacia hidrográfica do Ribeirão Santa Bárbara.

Fonte: Autores (2019).

Conjunto de dados

Por se tratar de um modelo simples que não requer muitas variáveis distintas, foram utilizados dados de precipitação e evapotranspiração como informações de entrada. Os dados de precipitação foram obtidos por meio de consulta à base Hidroweb, uma ferramenta do Sistema Nacional de Informação sobre Recursos Hídricos (SNIRH) da Agência Nacional de Águas (ANA). Optou-se por obter dados de três estações pluviométricas diferentes a fim de calcular a precipitação média pelo método dos polígonos de Thiessen, obtendo maior representatividade. As estações utilizadas foram as de código 1849016, 1749002 e 1850000, já o dado de evapotranspiração foi coletado no Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP). Para fins de aplicação

no modelo foi escolhido o período de dez anos, sem falhas, compreendido entre agosto de 1977 e setembro de 1987.

Tank Model

O modelo de Tank Model compreende a representação de fluxos internos e externos de uma determinada área de drenagem baseados no balanço hídrico. Este modelo pode envolver um ou diversos agrupamentos de tanques, que podem haver saídas laterais e de fundo em cada um deles. Diante disto, os escoamentos laterais representam descargas de chuvas com respostas imediatas ou atrasadas, e os escoamentos de fundo são aquelas que partem do fluxo de infiltração, estas não contribuem diretamente para o fluxo de superficial (XIONG *et al.* 2009).

Neste estudo para o modelo de discretização diário adotaram-se dois tanques, como pode ser observado na Figura 3, utilizando um total de 15 parâmetros. Estes parâmetros são expressos pelas seguintes definições:

- P = precipitação;
- E_{tp} = evapotranspiração potencial;
- H_1 e H_2 = alturas das lâminas d'água armazenadas nos tanques; a_1 , a_2 e a_3 = coeficientes de vazão lateral;
- b_1 e b_2 = coeficientes de vazão de fundo;
- h_1 , h_2 e h_3 = alturas dos orifícios das saídas laterais; q_1 , q_2 e q_3 = escoamento superficial;
- q_{b1} e q_{b2} = descargas de fundo;
- CE = coeficiente de evapotranspiração.

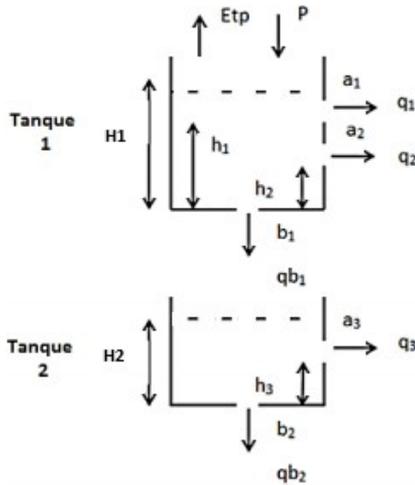


Figura 3 – Design do modelo Tank Model.

Fonte: Adaptado de Pereira *et al.* (2015-2016).

Para os parâmetros iniciais de precipitação foram escolhidas três estações pluviométricas e realizados os cálculos das precipitações médias, através das áreas de influência, aplicando o método de Thiessen. Por este método foi possível obter dados diários das estações pluviométricas com período de 10 anos. Quanto à evapotranspiração foi determinada a partir da média dos dados, referentes ao período de estudo, obtidos pela base climatológica.

Os coeficientes representados por a, b e Ce foram inicialmente estimados. Quanto a análise do primeiro tanque, foi necessária aplicação na equação do balanço hídrico, demonstrado pela Equação 1.

$$H1(a1,t) = H(t1) + P(t) - Etp(t) * Ce \quad (1)$$

Caso o resultado desta equação seja superior a 0, $H1(a1,t) > 0$, indica que existirá escoamento pelos orifícios laterais $q1$, caso contrário este escoamento será nulo, $q1=0$. O próximo parâmetro que foi analisado é o escoamento superficial diário no primeiro orifício $q1$, representado pela Equação 2, neste caso se $H1(a1,t) > h1$, significa que houve escoamento em $q1$, caso contrário não houve fluxo, isto significa que a altura da água no tanque 1 não conseguiu ultrapassar a altura do orifício para que ocorra o escoamento.

$$q_1(t) = a_1 * (H_1(a_1, t) - h_1) \quad (2)$$

O segundo orifício do tanque é o escoamento superficial q_2 , representado pela Equação 3, para que haja escoamento é necessário que $H_1(a_2, t) > h_2$, caso contrário não poderá haver fluxo. Portanto, a altura da lâmina d'água deverá ser maior que a altura do orifício para que ocorra escoamento.

$$q_2(t) = a_2 * (H_1(a_2, t) - h_2) \quad (3)$$

Ao final do tanque as descargas de fundo representam o fluxo subterrâneo que posteriormente servirá de entrada para o tanque 2. Mas para que isso ocorra, é preciso que seja estimada a altura da lâmina d'água armazenada logo após as saídas $H_1(b_1, t)$, através da diferença entre o $H_1(a_2, t)$, altura da lâmina armazenada e o $q_2(t)$, escoamento superficial. Em seguida para as estimativas diárias de descarga de fundo, $q_{b1}(t)$, é dada pela Equação 4. Se $H_1(b_1, t) > 0$, então haverá armazenamento, caso contrário não haverá escoamento.

$$q_{b1}(t) = b_1 * H_1(b_1, t) \quad (4)$$

Após definido a altura final do armazenamento, $q_{b1}(t)$, é possível encontrar a $H_1(t \text{ final})$ através da diferença entre $q_{b1}(t)$ e $H_1(b_1, t)$. O armazenamento no tanque 2 será definida a partir da infiltração no tanque superior. Isto significa que, a altura da lâmina de água armazenada, $H_2(a_3, t)$, corresponde a vazão de descarga de fundo $q_{b1}(t)$ e a altura da lâmina de água pré-existente neste tanque, $H_2(t \text{ inicial})$. Assim quando aplicada $H_2(a_3, t)$ na Equação 5, estima-se a vazão do orifício lateral deste tanque, $q_3(t)$.

$$q_3(t) = a_3 * (H_2(a_3, t) - h_3) \quad (5)$$

Assim, se $H_2(a_3, t) > h_3$, então a altura da lâmina de água será maior que o orifício e haverá escoamento, em caso de $q_3(t) = 0$, o escoamento será nulo. Para identificar a altura da lâmina do reservatório $H_2(b_2, t)$ pode-se aplicar a diferença entre a lâmina armazenada $H_2(a_3, t)$ e o fluxo do orifício lateral $q_3(t)$. Em seguida é possível utilizar a lâmina

identificada e aplicá-la ao cálculo da descarga de fundo, $q_{b2}(t)$, do tanque 2, conforme Equação 6.

$$q_{b2}(t) = b_2 * H_2(b_2, t) \quad (6)$$

Sendo assim, a altura da lâmina de água final, $H_2(t \text{ final})$, no tanque pode ser obtida pela retirada o fluxo de descarga $q_{b2}(t)$ da altura da lâmina do reservatório $H_2(b_2, t)$.

Nash-Sutcliffe

Para este modelo e como parte da análise, foram realizados processos de calibração e de validação dos dados diários obtidos. Para esse processo foi utilizado suplemento solver do software Excel em que, de acordo com Barati (2013), atua em células que estão diretas ou indiretamente relacionadas à função objetivo na célula-alvo onde identificam-se células ajustáveis para otimizar o valor da célula de destino. Como forma de calibração do solver utilizou-se o Gradiente Reduzido Generalizado (GRG), um código de otimização não linear que obteve sua implementação científica comprovada como uma das mais confiáveis quanto a resolução de problemas não lineares (SMITH; LASDON, 1992).

A aplicação do solver busca aproximar os valores simulados dos observados através da aplicação do coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe (1970), uma função objetiva não-linear. Os dez anos de análise foram separados em dois períodos de cinco anos cada, sendo que, para calibração utilizou-se dados do ano de 01/09/1977 a 31/08/1982 e para validação de 01/09/1982 a 31/08/1987.

Nesta etapa foram definidos todos os valores das vazões que foram trabalhados, são as vazões calculadas pelo modelo e aquelas observadas em estação fluviométrica. A vazão de fluxo total nos tanques, Q_{total} , foi definida pela somatória dos fluxos nos orifícios laterais, representada pela Equação 7 e a vazão observada, Q_{obs} , adquirida a partir da transformação dos dados retirados no posto fluviométrico.

$$Q_{total} = q_1 + q_2 + q_3 \quad (7)$$

Após a obtenção dos resultados, aplicou-se a Equação 8, para determinar o coeficiente de Nash-Sutcliffe.

$$eNS = 1 - \frac{dy \sum (Q_{total} - Q_{obs})^2}{dx \sum (Q_{obs} - Q_{med})^2} \quad (8)$$

Foram obtidos dois valores do coeficiente Nash-Sutcliffe, o primeiro valor corresponde aos cinco anos iniciais de dados, usados para calibração do modelo. Já segundo coeficiente foi obtido pelos valores dos últimos 5 anos, sendo esses utilizados na validação do modelo.

A eficiência de Nash-Sutcliffe pode variar de $-\infty$ a 1, sendo que uma eficiência igual a 1 representa o ajuste perfeito aos dados de vazões observadas. Quando o coeficiente se aproxima de zero, indica que as previsões do modelo são tão precisas quanto a média dos dados observados, porém se o coeficiente apresentar valores inferiores a zero, indica que a média observada é um indicador melhor do que o modelo. No entanto, pode-se concluir que quanto mais próximo à eficiência for do valor unitário, mais preciso será o modelo (CELESTE; MENEZES; FONTES, 2014).

Resultados e discussão

Os resultados obtidos para os parâmetros estão dispostos na Tabela 1 e foram os mesmos utilizados para o processo de otimização. O método GRG não linear apresentou processo de otimização relativamente rápido, quando consideradas as configurações do computador utilizado, visto que o tempo de processamento foi de 480 s para um processador Intel(R) Core (TM) i3-3217U, CPU 1.80GHz e memória de RAM 4GB.

Tabela 1 – Parâmetros calibrados pelo método GRG não linear para o Tank Model a partir de dados de vazão diária.

Parâmetro	Vazão mensal
h1	11,598 mm
h2	11,598 mm

h3	0,000 mm
a1	0,055
a2	0,036
a3	0,006
b1	0,527
b2	0,003

Fonte: Autores.

Os resultados representados pelos eNS obtidos, podem ser considerados satisfatórios em termos de modelagem hidrológica, pois o modelo aplicado entregou coeficientes para a calibração de 0,875 e para a validação de 0,737, valores que estão dentro da faixa encontrada em outros estudos como, por exemplo, em aplicação do Tank Model realizada por Nunes *et al.* (2014) foram encontrados valores de Nash iguais a 0,60 e 0,45, para calibração e validação respectivamente, enquanto Celeste, Menezes e Fontes (2014) encontraram valores de Nash para calibração e validação iguais a 0,88 e 0,57, respectivamente.

Dessa forma os resultados desta pesquisa mostram uma precisão da ordem de 87% na série de vazão mensal observada, demonstrando boa qualidade dos resultados da simulação, sendo que os coeficientes de correlação (R) se apresentaram altos, tanto para calibração (R = 0,88), quanto para validação (R = 0,80). Os fluviogramas dos processos estão dispostos nos Figuras 4 e 5.

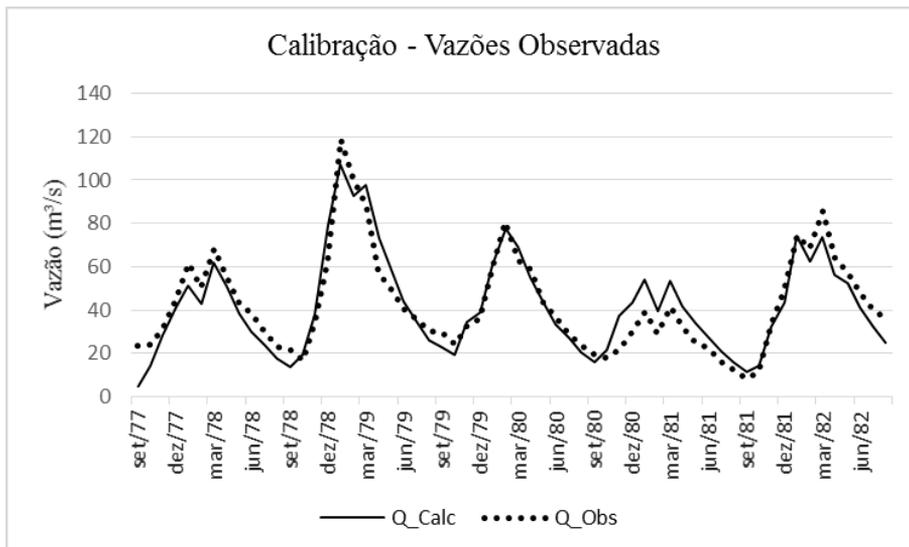


Figura 4 – Calibração a partir de dados de vazão mensal, usando o método GRG não linear. Fonte: Autores (2019).

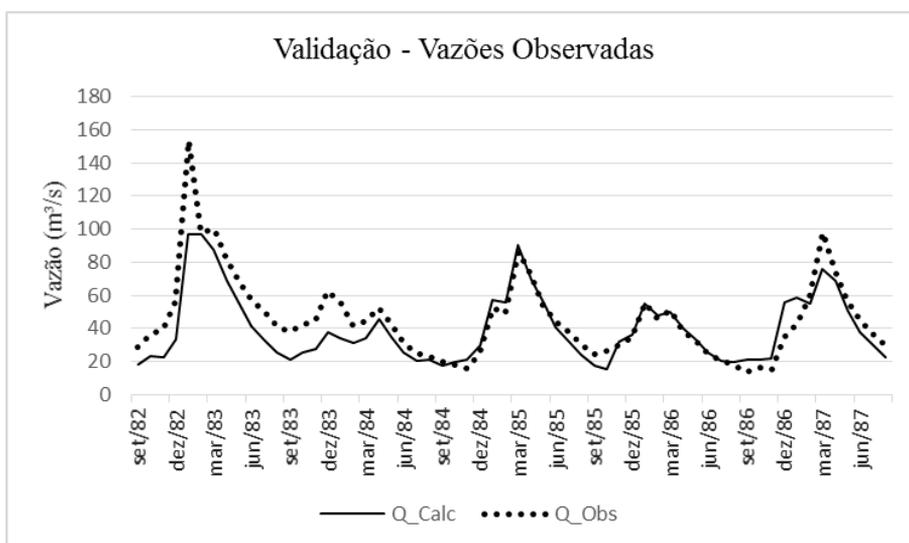


Figura 5 – Calibração a partir de dados de vazão mensal, usando o método GRG não linear.

Fonte: Autores (2019).

Em relação à calibração foi possível perceber que as vazões calculadas se adaptaram bem à curva das vazões observadas, representando de forma satisfatória os picos de cheia e de recessão, notando uma forte aderência entre as curvas. No entanto, para o período de validação, observou-se que o modelo apresentou uma sincronia inferior, entre as séries, quando comparada a validação, resultando na subestimação das vazões de pico em alguns trechos.

A modelagem das vazões é essencial para o entendimento do ciclo hidrológico, para gestão dos picos de enchentes e escassez que podem ser acometidas em uma bacia, principalmente quanto aos estudos de implantação de barramentos, assim como o desenvolvido por Mendes *et al.* (2007) na bacia hidrográfica de Flores de Goiás, além de subsidiar correlações entre as mudanças quanto ao uso e ocupação do solo.

Outra aplicação de modelos chuva-vazão pode ser observada na área de simulação de séries históricas de vazão, para utilização em bacias hidrográficas sem dados. Blanco, Favre e Secretan (2007) aplicaram um modelo chuva-vazão visando à simulação de curvas de permanência em pequenas bacias hidrográficas da Amazônia, demonstrando uma alternativa para geração de dados, ao invés da implantação de redes de monitoramento. Já Nunes *et al.* (2014) aplicaram o Tank Model para estimar vazões mensais em um trecho do Rio Piancó, com o objetivo de compreender o potencial hídrico das águas superficiais de sua sub-bacia.

Em virtude da simplicidade de aplicação do modelo, visto que foram necessários apenas dois dados de entrada (precipitação e evapotranspiração), bem como a calibração automática executada pelo algoritmo e tendo em vista os resultados positivos encontrados nesse estudo, considera-se o emprego do Tank Model, para modelagem de vazões mensais na bacia hidrográfica do Ribeirão Santa Bárbara, satisfatório.

Conclusão

O Tank Model, utilizado para a análise dos dados de séries históricas de precipitação e de evapotranspiração na bacia do ribeirão Santa Bárbara em Goiás, apresentou um bom desempenho, a pesar dos poucos dados de entrada. Esse desempenho ocorreu, principalmente, pelo fato de que a aplicação da técnica de programação não-linear conseguiu se comportar de forma simples e eficaz quanto ao entendimento do comportamento da bacia. Com a aplicação, foi possível identificar os picos e as recessões dos dados, apresentando uma boa correlação com as análises realizadas e demonstrando coerência com a realidade. Este desempenho pôde ser verificado pela utilização do Coeficiente Nash com precisão obtida na ordem de 87% e 78%, quanto a calibração e validação respectivamente.

Este modelo pode ser aplicado como metodologia para a gestão e planejamento de bacias hidrográficas, uma vez que embasa e viabiliza estudos auxiliando na tomada de decisões em implantações de projetos. É de conhecimento o quanto é oneroso o investimento em equipamentos de obtenção de dados de vazão e muitas vezes não há recursos suficientes para a implantação de redes de monitoramento, com isso torna-se fundamental a aplicação de modelos como o Tank Model em locais onde não há disponibilidade de dados, já que não exigem informações detalhadas da área a ser estudada.

Contudo, de acordo com os resultados apresentados neste trabalho, conclui-se que a aplicação o Tank Model é um modelo satisfatório para essa região, porém sugere-se que sejam aplicados outros modelos hidrológicos, a fim de comparar seus desempenhos.

Referências

ALMEIDA, L.; SERRA, J. C. V. Modelos hidrológicos, tipos e aplicações mais utilizadas. Revista FAE, v. 20, n. 1, p. 129–137, jan./jun. 2017.

ANA (Agência Nacional de Águas). Hidroweb: séries históricas de estações. Disponível em: http://www.snirh.gov.br/hidroweb/publico/mapa_hidroweb.jsf. Acesso em: 16 set. 2018.

BARATI, R. Application of Excel Solver for parameter estimation of the Nonlinear Muskingum Models. *KSCE Journal of Civil Engineering*, v. 17, n. 5, p. 1139-1148, 2013.

BDMEP (Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa). Séries históricas mensais. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/projetos/rede/pesquisa/>. Acesso em: 29 set. 2018.

BLANCO, C. J. C.; FAVRE, A. C.; SECRETAN, Y. Análise, aplicação e transposição de um modelo chuva-vazão para simulação de curvas de permanência de pequenas bacias da Amazônia. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 12, n. 1, p. 205–216, jan./mar. 2007.

CELESTE, A. B.; CHAVES, Vanessa Silva. Avaliação de algoritmos de otimização e funções objetivo para calibração automática do modelo chuva-vazão Tank Model. *Ciência e Natura*, v. 36, n. 3, p. 527- 537, 2014.

CELESTE, A. B.; MENEZES, T.; FONTES, V. Modelagem do processo chuva-vazão pelo Tank Model e por redes neurais artificiais na Bacia do Rio Japarutuba. *Scientia Plena*, v. 10, n. 7, p. 2014.

EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). Latossolos: definição e características gerais. Disponível em: http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/solos_tropicais/arvore/CONTAG01_11_2212200611540.html. Acesso em: 1º out. 2018.

INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). Normas Climatológicas Históricas (1961-1990): Precipitação Acumulada Mensal e Anual. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=estacoes/estacoesAutomatica>. Acesso em: 29 set. 2018.

LUCAS, E. W. M.; SOUSA, F. de A.; SILVA, F. D. dos S.; LUCIO, P. S. Modelagem hidrológica determinística e estocástica aplicada à região hidrográfica do Xingu, Pará. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 24, n. 3, p. 308-322, 2009.

MENDES, T. A.; VIEIRA, M. E. A.; FRANCO, C.; VILELA, L. de F.; FORMIGA, K. T. M.; BARBALHO, F. D. Aplicação do Tank Model na modelagem da bacia hidrográfica de Flores de Goiás. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 17., 2007, São Paulo. Anais [...]. Goiânia: UFG, 2007. p. 1-15.

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

NUNES, F. M. S.; FARIAS, C. A. S. de; MARTINS, W. A.; ALMEIDA, R. N. de; LEITE, J. C. A. Aplicação do Tank Model para estimativa mensal de vazões na Bacia Hidrográfica do Rio Piancó. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, v. 9, n. 1, p. 343-349, jan./mar. 2014.

PEREIRA, T. S. R.; SANTOS, K. A. dos; SILVA, B. F.; FORMIGA, K. T. M.; SOARES, A. K. Desenvolvimento de um modelo chuva-vazão via Tank Model e calibração automática. *Revista Eletrônica de Engenharia Civil*, v. 11, n. 3, p. 17-28, dez. 2015/jun. 2016.

SMITH, S.; LASDON, L. Solving large sparse nonlinear programs using GRG. *ORSA Journal on Computing*, v.4, n.1, p. 2–15, 1992.

SUGAWARA, M. Automatic calibration of the Tank Model. *Hydrological Science Bulletin*, v. 24, n. 3, p. 375-388, 1979.

XIONG, J.; OHNISHI, Y.; TAKAHASHI, K.; KOYAMA, T. Parameter determination of multi-tank model with dynamically dimensioned search. *Proceedings of the Symposium on Rock Mechanics*, v. 38, p. 19-24, jan. 2009.