



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Calibração e validação de modelos hidrológicos para uma bacia hidrográfica do estado de Goiás*

Mirtes Tatiane Neisse Boldrin¹, Sarah Haysa Mota Benício², Andriane de Melo Rodrigues³, Luciano de Oliveira⁴, Klebber Teodomiro Martins Formiga⁵.

¹ Doutoranda em Ciência Ambientais na Universidade Federal de Goiás. Avenida Esperança s/n, Campus Samambaia, CEP 74690-900 Goiânia – Goiás. mirtes.boldrin@gmail.com (autor correspondente). ² Doutoranda em Ciência Ambientais na Universidade Federal de Goiás. Avenida Esperança s/n, Campus Samambaia, CEP 74690-900 Goiânia – Goiás. hay.benicio@gmail.com. ³ Doutoranda em Ciência Ambientais na Universidade Federal de Goiás. Avenida Esperança s/n, Campus Samambaia, CEP 74690-900 Goiânia – Goiás. andriane.melo@gmail.com. ⁴ Doutorando em Ciência Ambientais na Universidade Federal de Goiás. Avenida Esperança s/n, Campus Samambaia, CEP 74690-900 Goiânia – Goiás. oliveira.luciano@discente.ufg.br. ⁵ Professor Adjunto da Universidade Federal de Goiás. Praça Universitária s/n, Bloco A, Sala 8, Setor Universitário, CEP 74605-220 – Goiânia – Goiás. klebber.formiga@gmail.com. *Resumo expandido publicado no VIII Workshop Internacional sobre Planejamento e Desenvolvimento Sustentável de Bacias Hidrográficas.

Artigo recebido em 07/12/2021 e aceito em 13/06/2022

RESUMO

Este trabalho teve o objetivo de implementar, calibrar e validar os modelos conceituais de chuva-vazão *Tank Model* e *HyMOD* no intuito de simular a vazão na bacia hidrográfica do Rio das Almas no estado de Goiás. O conjunto de dados utilizados abrangeu uma série de 32 anos de dados hidrológicos diários (01 de agosto de 1982 a 31 de julho de 2017), os anos de 1995, 1996 e 1997 foram excluídos por não apresentarem dados completos de vazão. Os dados de precipitação foram obtidos através dos registros das três estações pluviométricas localizadas na área da bacia e o volume de precipitação média diária foi calculada por meio do Método de Thiessen. A otimização dos parâmetros dos modelos *Tank Model* e *HyMOD* foi realizada por meio de dois métodos automáticos de calibração utilizando algoritmos da ferramenta *Solver* do *Excel*: Programação não-linear do Gradiente Reduzido Generalizado (GRG) e o método *Evolutionary*. Tais algoritmos foram aplicados considerando dados de vazão e precipitação em escala diário e mensal. Essas escalas foram utilizadas com intuito de compara os resultados obtidos. A análise de desempenho foi realizada com o coeficiente de eficiência *Nash-Sutcliffe* (NSE). Ambos os modelos puderam ser calibrados de maneira satisfatória para os dados de entrada da bacia em estudo e apresentaram melhor desempenho na escala mensal. Entretanto, o *HyMOD* apresentou melhor ajuste na calibração (NSE: 0,80) e maior flexibilidade no ajuste dos coeficientes NSE e uma representação gráfica mais precisa quando comparada ao *Tank Model* (NSE: 0,75).

Palavras – chave: Modelagem Hidrológica, calibração, validação, *HyMOD*, *Tank Model*.

Calibration and validation of hydrological models for a hydrographic basin in the state of Goiás.

ABSTRACT

This work aimed to implement, calibrate, and validate the conceptual rain-runoff models *Tank Model* and *HyMOD* to simulate the flow in the Rio das Almas hydrographic basin in the state of Goiás. The dataset used covered a series of 32 years of daily hydrological data (August 1, 1982, to July 31, 2017), the years 1995, 1996 and 1997 were excluded for not presenting complete flow data. Precipitation data were obtained from the records of the three pluviometric stations located in the basin area and the daily mean precipitation volume was calculated using the Thiessen Method. The optimization of the parameters of the *Tank Model* and *HyMOD* models was performed using two automatic calibration methods using algorithms from the *Excel Solver* tool: Nonlinear Generalized Reduced Gradient (GRG) programming and the *Evolutionary* method. Such algorithms were applied considering flow and precipitation data on a daily and monthly scale. These scales were used to compare the results obtained. The performance analysis was performed with the *Nash-Sutcliffe* efficiency coefficient (NSE). Both models could be satisfactorily calibrated for the input data of the basin under study and presented better performance in the monthly scale. However, the *HyMOD* showed better calibration adjustment (NSE: 0.80) and greater flexibility in the adjustment of NSE coefficients and a more accurate graphical representation when compared to the *Tank Model* (NSE: 0.75).

Keywords: Hydrological Modeling, Calibration, Validation, *HyMOD*, *Tank Model*.

Introdução

Os recursos hídricos são diretamente afetados pelas alterações nas condições climáticas. Pois, por meio dessas alterações podem ocorrer interferências nas intensidades dos processos hidrológicos ocasionando assim condições que favorecem eventos de estresse hídrico (Negewo e Sarma, 2021; Odongo et al., 2019; Qiu et al., 2019; L. . Zhang et al., 2018).

Além da variabilidade climática, as alterações antropogênicas no uso e cobertura do solo e as mudanças no regime hídrico encontram-se entre os maiores desafios globais a serem enfrentados nos estudos hidrológicos (Garg et al., 2019; Papadaki e Dimitriou, 2021).

Dentre os processos hidrológicos, a vazão pode ser descrita como o resultado do balanço hídrico, que retrata a disponibilidade hídrica em uma bacia hidrográfica, tanto no espaço, quanto no tempo. O monitoramento das vazões nos cursos d'água possibilita desde processos de outorga e atendimento das demandas dos usos múltiplos da água, até a operação de hidrelétricas e previsão de enchentes, sendo uma informação de fundamental importância para o gerenciamento dos recursos hídricos (Campagnolo et al., 2021).

Pensando na gestão sustentável da água e na preservação do patrimônio ecológico, as previsões de resposta dos regimes de vazão à variabilidade climática contribuem para o entendimento da distribuição espaço-temporal de futuras secas e conhecimento dos riscos de enchentes em áreas urbanas (Brouziyne et al., 2020, 2021).

No entanto, as limitações de dados hidrológicos monitorados no território brasileiro têm sido uma realidade, sendo comum a inexistência de estações hidrométricas em várias bacias hidrográficas. Além de falhas temporais nos dados de registros históricos ocasionadas principalmente por problemas operacionais nos equipamentos (Duan et al., 2006; Moraes, 2016).

Como alternativa, os modelos hidrológicos vêm sendo frequentemente utilizados na estimativa das vazões, de modo a alcançar valores próximos aos dados reais (Al-Asadi et al., 2020; S. Zhang e Al-Asadi, 2019). Os modelos são capazes de descrever o ciclo hidrológico de forma simplificada, no intuito de reproduzir os fenômenos que ocorrem no sistema natural, podendo ser usados para prever e solucionar problemas vinculados aos processos hidrológicos (Al-Asadi et al., 2020; Sood & Smakhtin, 2015).

Os modelos de chuva-vazão descrevem as relações entre as entradas e saídas de água na bacia

hidrográfica por meio de equações matemáticas, em que os dados de precipitação são inseridos no modelo a fim de calcular a vazão (Beven, 2012). Existem variadas formas de classificar e dividir os modelos, seja com base na resolução espacial, tipo de entrada/saída, simplicidade do modelo ou em função da interpretação espacial da área modelada, cada tipo calcula a relação entre precipitação e vazão de uma forma diferente (Sitterson et al., 2018).

Os modelos *Tank Model* e HyMOD são modelos conceituais, utilizados para estimar a vazão de corpos hídricos por meio da relação chuva-vazão, sendo comum utilizar métricas para avaliar os modelos, tais como, o coeficiente de eficiência *Nash-Sutcliffe* (NSE) (Nash e Sutcliffe, 1970).

Diversos estudos confirmam a precisão e aceitação dos modelos hidrológicos existentes, Boyle et al. (2000) utilizaram o HyMOD e observaram que a modelagem se ajusta bem com a observação *in situ*, no entanto reforça a importância de dados mais robustos para uma melhor simulação. Como é o exemplo do trabalho Zhang et al. (2019) que avaliou os efeitos de conjuntos numéricos sobre HyMOD e observou que as previsões do modelo podem ser melhoradas controlando o erro numérico através da manipulação de algoritmos específicos, em vez de apenas comparar o desempenho de uma série de esquemas numéricos selecionados. Kheimi e Abdelaziz (2022) investigaram a aplicabilidade do *Tank Model* em variadas condições hidrológicas na Coreia do Sul. Este estudo ressaltou a importância de complementar as abordagens tradicionais para desenvolver relação entre os parâmetros do modelo com as características da bacia. O trabalho desenvolvido por Al-Asadi et al. (2020) aplicou o *Tank Model* a uma bacia hidrográfica situada no estado da Georgia nos Estados Unidos com o objetivo de simular a relação chuva-vazão.

Os modelos hidrológicos podem ter diferentes aplicações práticas como é o caso do estudo de Kagabu et al. (Kagabu et al., 2020) que empregou o *Tank Model* para demonstrar a presença, intensidade e o mecanismo da variação da água subterrânea dentro da estrutura de um aquífero, após um terremoto na região da cidade de Kumamoto. Nesse estudo, a aplicação do *Tank Model* identificou um aumento anormal do volume do nível da água subterrânea após o terremoto, em decorrência do aumento da permeabilidade do solo. Estudo desenvolvido por Goodarzi et al. (2021a) aplicou o *Tank Model* em bacias hidrográficas de diferentes escalas (pequenas, médias e grandes).

Este estudo demonstrou que a qualidade da modelagem chuva-vazão retornou resultados melhores para as bacias de médio e grande porte. Enquanto no trabalho de Hapsari et al. (2021) o Tank Model foi empregado para simular a dinâmica de umidade no solo com o intuito de derivar indicadores relacionados a deslizamentos de terra.

Em outros casos vários modelos são selecionados para possibilitar uma análise mais abrangente. O HyMOD foi selecionado, em conjunto com outros modelos para avaliar a disponibilidade hídrica de bacias hidrográficas localizadas na Etiópia (Meresa et al., 2022) e no oeste da África (Chabi et al., 2021). Já no estudo desenvolvido por Satgé et al. (2021) o HyMOD foi utilizado em conjunto com o GR4j para investigar a confiabilidade dos dados disponíveis para dez bacias hidrográficas na região Amazônica. Enquanto Kim et al. (2022) utilizou o HyMOD, juntamente com um modelo climático regional para comparar o desempenho de modelos de correção de vies de descargas observadas no período estudado.

Os modelos hidrológicos conceituais também são empregados em estudos que objetivam preencher as lacunas deixadas pela falta de dados hidrológicos, como o trabalho de Goodarzi et al. (2021b) que adaptou o método de calibração regional no Tank Model e incluiu atributos ecológicos (características da paisagem) aos dados da bacia, os resultados foram aceitáveis mostrando uma abordagem alternativa a calibração tradicional. Bastola (2022) realizou processo denominado regionalização de parâmetros de um modelo, onde ocorre a transferência de parâmetros de uma bacia calibrada para uma bacia não calibrada. Para isso o HyMOD foi empregado para calibrar parâmetros de 59 bacias hidrográficas espalhadas pelo mundo.

Estão disponíveis ainda estudos que buscam aprimorar os modelos hidrológicos tradicionais. Yang et al. (2021) adequaram o Tank Model para a previsão de armazenamento de reservatório afetado pela precipitação, drenagem natural e fatores de inundação humana. Enquanto Shende (2021), desenvolveu uma equação diferencial de primeira ordem para encontrar a quantidade da vazão em cada tanque em um determinado tempo, e após a soma dos escoamentos dos tanques calculou o escoamento total. Esse método foi utilizado como forma de encorpar ainda mais os dados do Tank Model. Já o estudo de Meng et al. (2021) adequou o Tank Model para que as depressões cársticas fossem consideradas pelo modelo na geração de escoamento superficial, interfluxo, escoamento de águas subterrâneas e dinâmica da umidade do solo.

Kwon et al. (2020) desenvolveram um modelo híbrido que incorporou variáveis do Tank Model conceitual dentro da estrutura de máquina de vetores de suporte de mínimos quadrados (LSSVM, sigla em inglês).

O desenvolvimento de novas metodologias que podem ser adicionadas as já existentes na literatura ajudam a aperfeiçoar os modelos hidrológicos disponíveis, ou ainda possibilitam o desenvolvimento de modelos mais eficientes a partir dos já existentes como é o caso dos trabalhos desenvolvidos por Kheimi e Abdelaziz (2022), Yang et al. (2021), Shende (2021), Meng et al. (2021) e Kwon et al. (2020).

Estudos como os citados acima demonstram a importância de se utilizar os modelos hidrológicos para projeções futuras. A escolha do melhor modelo deve ser baseada na finalidade da modelagem, por isso é necessário conhecer bem o problema e os dados disponíveis, além de identificar quais as respostas necessárias, levando em consideração as possíveis variações no tempo e no espaço (Beven, 2012). Sendo importante o conhecimento dos pontos fortes e fracos de cada modelo, levando em consideração àquele que melhor se adequa as particularidades e necessidades da pesquisa a ser desenvolvida (Horsburgh et al., 2016).

Com isso, este trabalho tem o objetivo de implementar, calibrar e validar os modelos conceituais de chuva-vazão *Tank Model* e HyMOD no intuito de simular a vazão (escoamento) na bacia hidrográfica do Rio das Almas, sub-bacia do Rio Tocantins-Araguaia, importante região hidrográfica brasileira.

Considerando os estudos de Goodarzi et al. (2021a) e Bastola (2022), que aplicaram os modelos Tank Model e HyMOD em bacias hidrográficas com áreas de drenagem de tamanho similar a área da bacia do Rio das Almas, a hipótese deste trabalho é que ambos os modelos serão capazes de simular as vazões da bacia hidrográfica dos Rio das Almas a partir dos dados hidrológicos disponíveis, retornando valores de NSE no mínimo satisfatórios para os períodos de calibração e validação.

Material e métodos

Área de estudo

A área de estudo é a bacia hidrográfica do Rio das Almas (Figura 1), que está localizada na unidade hidrográfica da Bacia Tocantins-Araguaia (15°43'11" N e 49°19'44" W). A delimitação da bacia foi realizada no Sistema de Coordenadas Planas: Sistema de Referência Geocêntrico para as

Américas (Sirgas) 2000, projeção Universal Transversa de Mercator (UTM), Zona 22S.

A partir do Modelo Digital de Elevação (MDE), extraído da base *Shuttle Radar*

Topography Mission (SRTM) na plataforma do Serviço Geológico Americano (USGS), foi realizada a delimitação da bacia hidrográfica de forma automática por meio do *software* ArcGIS.

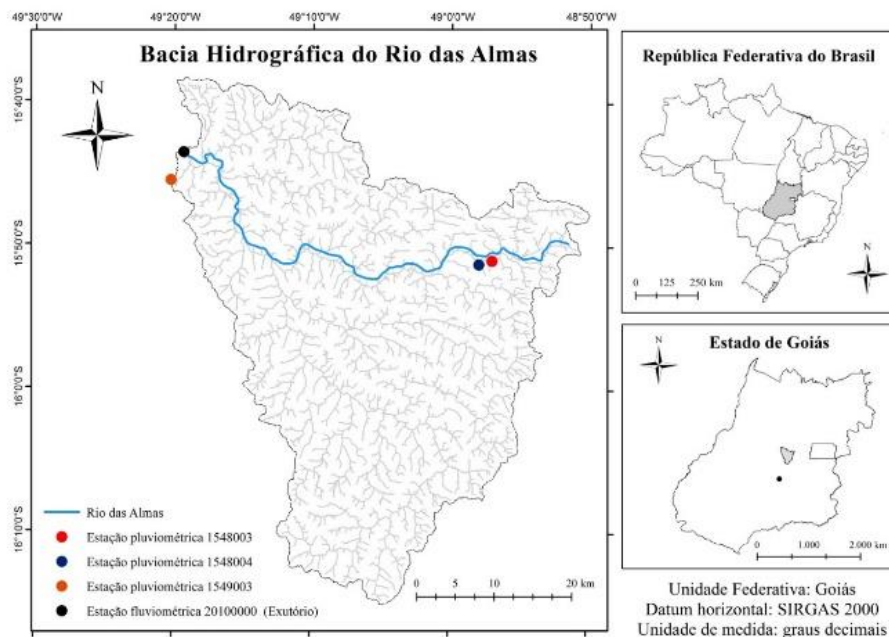


Figura 1. Bacia Hidrográfica do Rio das Almas.

Com 1.973 km² a bacia hidrográfica do Rio das Almas possui uma variação topográfica de 605 a 1.366 m acima do nível do mar. O rio principal possui 113,5 km de extensão, sua nascente está localizada no município de Pirenópolis a uma altitude de 1.150 m e seu exutório está localizado no município de Jaraguá a 605 m de altitude, resultando em um desnível de 545 m. Seu rio principal possui ordenação seis, de acordo com a classificação de Strahler e sua vazão média anual é de 500,71 mm.

O clima da região é tropical com duas estações bem definidas: inverno seco com temperatura média entre 10 °C e 27 °C e verão chuvoso com temperaturas de 18° a 35 °C. A bacia hidrográfica possui uma precipitação média anual de 1.645,5 mm (Método de Thiessen), sendo que o maior índice pluviométrico ocorre entre os meses de outubro e abril e a estiagem entre maio e setembro.

Dados de Entrada

Os dados utilizados para a implementação dos modelos foram obtidos através de websites que disponibilizam publicamente registros de dados hidrológicos.

As séries temporais com dados de vazão foram obtidas através da estação fluviométrica 20100000 (usada como o exutório na delimitação da bacia). Os dados de precipitação foram obtidos

através das estações pluviométricas 1548003, 1548004 e 1549003, no website HidroWeb que é mantido pelo Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH), sob gestão da Agência Nacional de Água (ANA) (SNIRH, 2020). Já os dados de evaporação foram obtidos no website do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2020).

O conjunto de dados utilizado neste estudo abrange uma série de 32 anos de dados hidrológicos diários (01 de agosto de 1982 a 31 de julho de 2017), sendo que os anos de 1995, 1996 e 1997 foram excluídos, pois não apresentavam dados completos de vazão. Os dados referentes ao período de 17/12/1989 a 21/12/1989 também foram excluídos, pois apresentam um evento de cheia que não condiz com os volumes de precipitação ocorridos no mesmo período para os outros anos, o que gerou uma inconsistência dos dados. A inclusão desses valores altera o resultado do NSE, prejudicando a calibração do modelo hidrológico, pois não é um comportamento que se repete, e sim um comportamento atípico no ano de 1989.

Para a obtenção de um volume de precipitação diária calculou-se a precipitação média diária de cada estação através do Método de Thiessen.

A série histórica dos dados de evaporação foi obtida junto ao Banco de Dados Meteorológico para Ensino e Pesquisa (BDMEP) do Instituto

Nacional de Meteorologia (INMET, 2020) através dos registros da estação 83376 localizada no município de Pirenópolis. Esta série contém um intervalo entre 01/09/1993 até 31/03/1994 que não houve registro de dados de evaporação. Com intuito de manter uma série de dados mais longa e não inviabilizar o uso dos dados desses dois anos optou-se por estimar os volumes evaporados neste período. A estimativa foi realizada através da média aritmética da evaporação diária dos anos anteriores (Exemplo: para estimar a evaporação do dia 01/09/1993 calculou-se a média aritmética de evaporação para os dias 01/09 dos anos anteriores). Este método de estimativa também foi utilizado para preencher dias dispersos no restante da série histórica que não tiveram registro do volume evaporado.

A implementação dos modelos foi realizada em duas escalas: diária (compreende dados de entrada diários) e mensal (considera a soma dos dados de entrada diários para cada mês do período analisado), no intuito de se obter séries de vazões “sintéticas” mensais para os dois modelos a fim de verificar qual série sintética possui melhor representatividade da realidade modelada pelo *Tank Model* e HyMOD, ou seja, qual série se ajusta aos dados reais de vazões.

Tank Model

O *Tank Model* é um modelo conceitual que foi desenvolvido por Sugawara e Fuyuki (1956). Ele representa o fluxo de água ao longo de uma

bacia hidrográfica e sua capacidade de simular relações hidrológicas para uma ampla gama de bacias hidrográficas permitiu a popularização desse modelo na análise da relação chuva-escoamento. Além disso, ele é muito utilizado para prever a existência de água e inundações em uma determinada bacia.

O funcionamento do *Tank Model* é considerado bastante simples em relação a outros modelos e se caracteriza pelo enchimento e esvaziamento de tanques. Esse esvaziamento pode ocorrer através de suas saídas laterais (escoamento) ou em sua saída inferior, quando o volume de água passa para o tanque subsequente. A soma dos volumes de água disponíveis em cada tanque representa o armazenamento de água na bacia hidrográfica (Pereira et al., 2016; Sugawara, 1995; Suryoputro et al., 2017).

Ainda segundo Sugawara (Sugawara, 1995), o *Tank Model* possibilita a representação de vários tipos de hidrogramas em decorrência de sua estrutura não linear ocasionada pelos ajustes das saídas laterais que se encontram um pouco acima do fundo de cada tanque (com exceção do tanque mais baixo).

Neste trabalho o *Tank Model* foi composto por dois tanques pois essa característica se adequa às condições climáticas da região estudada (PEREIRA et al., 2016). A representação do *Tank Model* aplicado neste trabalho é apresentada na Figura 2.

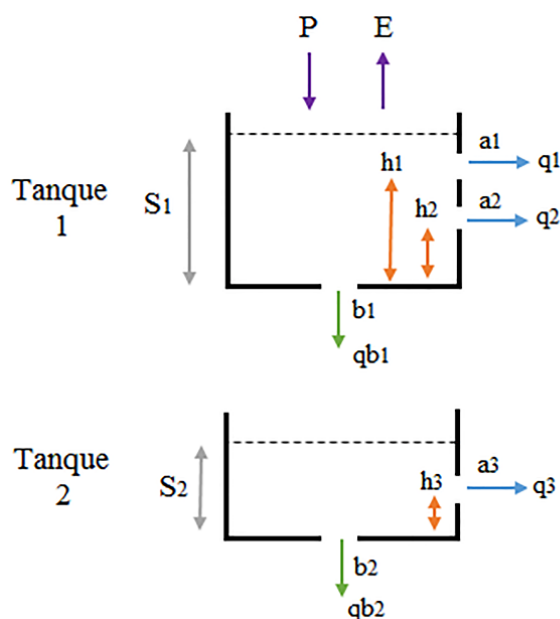


Figura 2. Representação do *Tank Model* utilizado.

Onde:

P = precipitação;

S₁ e **S₂** = alturas da água armazenada dentro de cada tanque;

E = Evaporação;

a₁, **a₂** e **a₃** = Coeficiente de vazão lateral;

b₁ e **b₂** = coeficiente de vazão de fundo;

h₁, **h₂** e **h₃** = alturas das saídas laterais;

q₁, **q₂** e **q₃** = escoamento superficial;

q_{b1} e **q_{b2}** = descargas de fundo.

Para a determinação das vazões por meio do *Tank Model* inicialmente é necessário realizar o balanço hídrico para o tempo (t) analisado (dia ou mês) para obter a altura de água armazenada no primeiro tanque. O balanço hídrico pode ser determinado por meio da equação 1.

$$S_{1(a1,t)} = S_{1(t)} + P_{(t)} - E_{(t)} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde K = coeficiente de evaporação.

Caso $S_{1(a1,t)} > 0$, haverá escoamento na saída $q_{1(t)}$, caso contrário esta saída será nula. O volume escoado pela saída q_1 pode ser determinado pela equação 2. Haverá escoamento na saída q_1 quando a altura da lâmina de água for maior que a altura dessa saída, ou seja: $S_{1(a1,t)} > h_1$, então $q_{1(t)} > 0$, senão $q_{1(t)} = 0$ indicando que não haverá escoamento.

$$q_{1(t)} = a_1 \cdot S_{1(a1,t)} - h_1 \quad (\text{Equação 2})$$

A vazão da segunda saída lateral (q_2) pode ser calculada através da seguinte equação 3. Essa vazão é determinada pela diferença entre o balanço hídrico do tanque $S_{1(a1,t)}$ e a vazão $q_{1(t)}$ que resultará na altura da lâmina de água após a vazão $S_{1(a2,t)}$. Se a altura da lâmina de água for maior que a altura da saída haverá escoamento $S_{1(a2,t)} > h_2$, então $q_{2(t)} > 0$, senão $q_{2(t)} = 0$ indicando que não haverá escoamento.

$$q_{2(t)} = a_2 \cdot S_{1(a2,t)} - h_2 \quad (\text{Equação 3})$$

Para determinar a descarga de fundo $q_{b1(t)}$ é necessário primeiramente identificar a altura da lâmina de água armazenada $S_{1(b1,t)}$ após as saídas laterais. Esse valor pode ser determinado pela diferença entre a altura da lâmina de água $S_{1(a2,t)}$ e a vazão de saída lateral $q_{2(t)}$. Com isso é possível

calcular a descarga de fundo por meio da equação 4.

$$q_{b1(t)} = b_1 \cdot S_{1(b1,t)} \quad (\text{Equação 4})$$

Na sequência é necessário determinar a altura da lâmina de água do segundo tanque $S_{2(a3,t)}$, que pode ser encontrada pela soma da infiltração do tanque superior $q_{b1(t)}$ e a altura de água armazenada inicialmente neste tanque $S_{2(t \text{ inicial})}$. Uma vez conhecida a altura da lâmina calcula-se a vazão lateral $q_{3(t)}$ por meio da equação 5. Se a altura da lâmina de água for maior que a altura da saída lateral haverá escoamento $S_{2(a3,t)} > h_3$, então $q_{3(t)} > 0$, senão $q_{3(t)} = 0$ indicando que não haverá escoamento.

$$q_{3(t)} = a_3 \cdot S_{2(a3,t)} - h_3 \quad (\text{Equação 5})$$

Em seguida determina-se a altura da lâmina de água $S_{2(b2,t)}$ por meio da diferença entre a altura $S_{2(a3,t)}$ e a vazão lateral $q_{3(t)}$. A altura $S_{2(b2,t)}$ é utilizada para calcular a vazão de fundo do segundo reservatório $q_{b2(t)}$ utilizando a equação 6. Considera-se a vazão $q_{b2(t)}$ como uma “perda” de água para o lençol subterrâneo. Após a sua determinação pode-se obter a altura final da lâmina de água $S_{2(t \text{ final})}$ para o tanque 2 através da diferença entre $S_{2(b2,t)}$ e a vazão de saída de fundo $q_{b2(t)}$.

$$q_{b2(t)} = b_2 \cdot S_{2(b2,t)} \quad (\text{Equação 6})$$

Com isso, a vazão de saída do modelo ou vazão calculada (Q_{calc}) pode ser obtida através da soma dos escoamentos laterais (q_1 , q_2 e q_3). Essa vazão corresponderá ao volume de água que escoou pela seção estudada dentro do período proposto.

HyMOD

O HyMOD é um modelo hidrológico de reservatórios que utiliza cinco parâmetros, sendo eles: o armazenamento máximo do reservatório de umidade do solo ($S_{m,Max}$), a proporção do fluxo rápido para o fluxo total, o número de tanques lineares com fluxo rápido, o coeficiente de fluxo rápido e o coeficiente do fluxo lento além do parâmetro de forma (S. Zhang & Al-Asadi, 2019).

Este modelo foi proposto inicialmente na tese de Wagener (1998) e publicado pelo mesmo autor e colaboradores no ano de 2001. O HyMOD simula o processo de chuva-escoamento de bacias

hidrográficas baseadas no princípio de distribuição de probabilidade (Moore, 1985), e é adequado para testar o impacto de esquemas numéricos na saída do modelo (Quan et al., 2015). A representação do

funcionamento do HyMOD é apresentada na Figura 3.

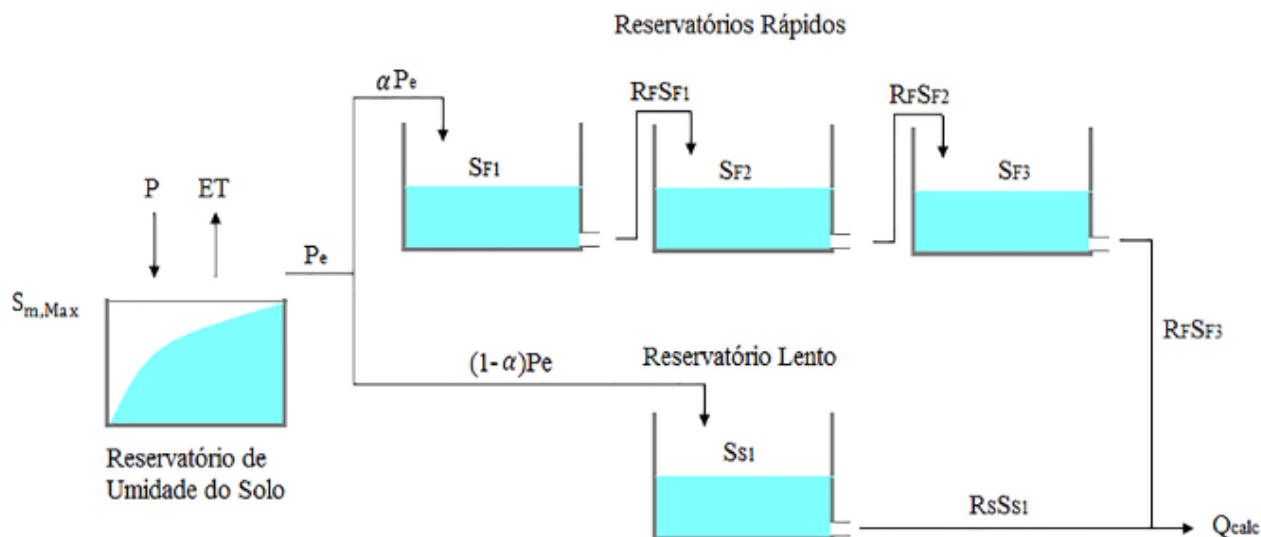


Figura 3. Representação do HyMOD.

Onde:

S_m = Primeiro reservatório;

P = Precipitação;

P_e = Precipitação efetiva;

ET = Evapotranspiração;

S_{F1} , S_{F2} e S_{F3} = Reservatórios de Fluxo rápido;

S_{S1} = Reservatório de Fluxo lento.

Já o valor da evapotranspiração é obtido através da equação 10 e consiste na multiplicação entre a evapotranspiração potencial e o coeficiente de ajuste W que é obtido pela razão entre S_m e $S_{m,MAX}$.

$$ET_{(t)} = W \cdot E_p \quad (\text{Equação 10})$$

O HyMOD é um modelo que trabalha com uma sequência de reservatórios para representar o funcionamento hidrológico de uma bacia hidrográfica. O escoamento ocorre quando a capacidade máxima do primeiro reservatório é excedida. Dessa forma, para a determinação da vazão por meio do HyMOD é necessário determinar o balanço hídrico do primeiro reservatório S_m para o tempo (t) a ser analisado (dia, mês ou ano). O balanço hídrico para o reservatório S_m é realizado através da equação 7. Para o cálculo do balanço hídrico é necessário, primeiramente obter a precipitação efetiva ($P_{e(t)}$) que pode ser encontrada através da equação 8 e 9.

$$S_{m(t)} = P - P_e - ET \quad (\text{Equação 7})$$

$$P_{e(t)} = F \cdot P \quad (\text{Equação 8})$$

$$F = 1 - (1 - S_{m,MAX})^\beta \quad (\text{Equação 9})$$

O reservatório S_m possui dois parâmetros a serem calibrados na implementação do modelo que contribuem para o cálculo do volume de água armazenado. São eles o $S_{m,MAX}$ que representa o volume máximo de armazenamento de água no solo e o β que é um coeficiente de ajuste do modelo. Estes dois parâmetros são os responsáveis por controlar a precipitação efetiva. Ou seja, sempre que o armazenamento máximo do reservatório S_m for atingido ($S_{m,MAX}$) toda a precipitação será convertida em escoamento na bacia.

Quando a capacidade máxima do primeiro reservatório é excedida ($P_{e(t)}$) o volume de água é dividido para outras duas sequências de reservatórios, os de fluxo rápido (R_F) e o de fluxo lento (R_S). Os reservatórios de fluxo rápido são os responsáveis pela geração de escoamento superficial na bacia, enquanto o reservatório de fluxo lento corresponde ao escoamento subterrâneo. Os volumes destinados a cada tipo de reservatório são definidos pelas equações 11 e 12 respectivamente.

$$R_{S_{F(t)}} = \alpha \cdot P_{e(t)} \quad (\text{Equação 11})$$

$$R_{S_{S(t)}} = (1 - \alpha) \cdot P_{e(t)} \quad (\text{Equação 12})$$

A variável α é o coeficiente de ajuste dos volumes de precipitação efetiva destinado a cada um dos reservatórios. Seu valor varia entre 0 e 1, sendo que quanto mais próximo a 1 o volume precipitado será direcionado aos reservatórios rápidos e quanto mais próximo de 0 o volume precipitado será direcionado ao reservatório lento.

O volume de água destinado aos reservatórios rápidos é direcionado ao primeiro reservatório $S_{F1(t)}$. Neste ponto é necessário determinar o volume de água armazenado neste reservatório através do cálculo do balanço hídrico por meio da equação 13.

$$S_{F1(t)} = \alpha P_{e(t)} - Q_{F1(t)} \quad (\text{Equação 13})$$

$Q_{F1(t)}$ representa o escoamento de fundo de tanque $S_{F1(t)}$ que será direcionado ao tanque $S_{F2(t)}$. O valor de $Q_{F1(t)}$ é determinado pela equação 14. Sendo que R_F é um coeficiente de ajuste do modelo que determina quanto do volume de água armazenado no reservatório $S_{F1(t)}$ será propagado para o reservatório seguinte.

$$Q_{F1(t)} = S_{F1(t)} \cdot R_F \quad (\text{Equação 14})$$

Na sequência determina-se o balanço hídrico para o segundo armazenamento $S_{F2(t)}$ que é obtido pela equação 15. Já o valor $Q_{F2(t)}$ é determinado pela equação 16. O mesmo procedimento é realizado para determinar os valores relacionado ao terceiro armazenamento $S_{F3(t)}$, conforme demonstrado nas equações 17 e 18.

$$S_{F2(t)} = Q_{F1(t)} - Q_{F2(t)} \quad (\text{Equação 15})$$

$$Q_{F2(t)} = S_{F2(t)} \cdot R_F \quad (\text{Equação 16})$$

$$S_{F3(t)} = Q_{F2(t)} - Q_{F3(t)} \quad (\text{Equação 17})$$

$$Q_{F3(t)} = S_{F3(t)} \cdot R_F \quad (\text{Equação 18})$$

A determinação do balanço hídrico do reservatório lendo $S_{S1(t)}$ se dá através da equação 19. Já o escoamento de fundo do reservatório lendo $Q_{S1(t)}$ é determinada pela equação 20.

$$S_{S1(t)} = (1 - \alpha) \cdot P_{e(t)} - Q_{S1(t)} \quad (\text{Equação 19})$$

$$Q_{S1(t)} = S_{S1(t)} \cdot R_s \quad (\text{Equação 20})$$

A vazão de saída do modelo (Q_{Calc}) é obtida por meio da soma das vazões de saída dos reservatórios S_{F3} e S_{S1} (Smith et al., 2008; Thorsten Wagener et al., 2001).

Calibração e Validação do Modelos

Os modelos *Tank Model* e *HyMOD* foram implementados em planilha *Excel*, posteriormente a otimização dos parâmetros foi realizada por meio de dois métodos automáticos de calibração do módulo *Solver* do *Excel*: (i) Método de Programação não-linear do Gradiente Reduzido Generalizado (GRG) e o método *Evolutionary*, com base em recomendações de Pereira et al. (2016) e Lich (2001).

No método do GRG os dados encontrados não dependem dos valores iniciais. Ou seja, independentemente do valor adotado para os parâmetros iniciais o valor final não tende a alterar significativamente, pois o GRG busca sempre o valor ótimo para todas as variáveis do modelo. Já o método *Evolutionary* tem forte dependência dos valores iniciais, sendo necessário realizar uma série de interações até atingir o ponto ótimo para as variáveis do modelo. Isso acontece, pois o método de solução *Evolutionary* busca os pontos ótimos locais e não global.

Para a implementação dos modelos os primeiros cinco anos foram repetidos com intuito de aquecer o modelo e assim eliminar a condição inicial de armazenamento que foi estimada na sua implementação.

O conjunto de dados hidrológicos utilizados na calibração e validação foi selecionado com base na série histórica de dados disponíveis nas estações citadas acima. O período de dados utilizados para calibrar o modelo foi de 1º de agosto de 1982 a 31 de julho de 1994, enquanto para validar o modelo utilizou-se o período de 1º de agosto de 1998 a 31 de julho de 2017.

Para a análise de desempenho dos modelos usou-se como função objetivo o coeficiente de eficiência *Nash-Sutcliffe* (NSE) (Nash e Sutcliffe, 1970), que pode ser obtido através da equação 21.

$$\max NSE = 1 - \frac{\sum (Q_{obs} - Q_{calc})^2}{\sum (Q_{obs} - Q_{méd})^2} \quad (\text{Equação 21})$$

Onde:

NSE = coeficiente de Nash-Sutcliffe;

Q_{obs} = vazão observada;

Q_{Calc} = vazão calculada pelo modelo chuva-vazão;

$Q_{\text{méd}}$ = vazão média observada.

De acordo com recomendações de Moriasi et al. (2007), Krause et al. (2005). O NSE é um dos critérios de medição de erro mais utilizados e consiste em uma estatística normalizada que varia de $-\infty$ a 1, quanto mais próximo de 1 mais precisos são os resultados (Nash e Sutcliffe, 1970). Em modelos hidrológicos, de acordo com estudos de Moriasi et al. (Moriasi et al., 2007) e Lin et al. (2017), os resultados do NSE podem ser interpretados como: i) insatisfatório para $\text{NSE} < 0,5$; ii) satisfatório para $0,5 < \text{NSE} < 0,65$; iii) bom para $0,65 < \text{NSE} < 0,75$; e iv) muito bom para $0,75 < \text{NSE} < 1$.

Resultados

A implementação dos modelos teve início com sua construção em tabela do *Excel*. Para isso foram inseridas as séries históricas de dados de vazão e precipitação em escalas diárias e mensais.

Em seguida, cada um dos modelos foi implementado levando em consideração suas equações e respectivas restrições.

Após a construção dos modelos teve início a etapa de calibração. Para isso foram atribuídos valores aleatórios para cada um dos parâmetros a serem otimizados. A atribuição desses valores levou em consideração as restrições de cada um dos reservatórios que compõe os modelos empregados. A Tabela 1 apresenta detalhadamente quais foram as restrições utilizadas para cada parâmetro utilizado na calibração do *Tank Model* e do *HyMOD*.

Em seguida foram calculadas as vazões de saída a partir dos valores aleatórios atribuídos. Também foi calculado o coeficiente de eficiência de *Nash-Sutcliffe* (NSE) com a finalidade de analisar o desempenho obtido com os parâmetros aleatórios iniciais.

Na sequência aplicou-se a ferramenta *Solver* do *Excel* com intuito de otimizar o valor de NSE. Para isso foram utilizados os métodos programação não-linear do Gradiente Reduzido Generalizado (GRG) e *Evolutionary*.

Tabela 1: Restrições de cada parâmetro para implementação do *Tank Model* e *HyMOD*.

<i>Tank Model</i>		<i>HyMOD</i>	
Parâmetros	Restrições	Parâmetros	Restrições
h1	$\geq 0; \geq h2$	Sm, MAX	$\geq 50; \leq 10000$
h2	$\geq 0; \leq h1$	β	$\geq 0,001; \leq 3$
h3	≥ 0	α	$\geq 0,001; \leq 1$
a1	$\geq 0; \geq a2; \leq 1$	Rf	$\geq 0,001; \leq 1$
a2	$\geq 0; \leq a1; \leq 1$	Rs	$\geq 0,001; \leq 1$
a3	$\geq 0; \leq 1$		
b1	$\geq 0; \leq 1$		
B2	$\geq 0; \leq 1$		
E	$\geq 0; \leq 1$		

Tank Model

Os parâmetros iniciais e os parâmetros otimizados relacionados à implementação do *Tank Model* são demonstrados na Tabela 2.

Após diversas rodagens do modelo, com intuito de melhorar os resultados de NSE para os dados da Bacia Hidrográfica do Rio das Almas a ferramenta *solver* do *Excel* retornou o valor considerado ótimo que é apresentado na Tabela 2 para as escalas diário e mensal.

Neste estudo considera-se como valor ótimo os maiores valores de NSE que foram retornados pela ferramenta *solver*.

Uma comparação entre as vazões reais (Qobs) e as vazões calculadas (Qcalc) por meio do

Tank Model para a escala diária dos dados da Bacia Hidrográfica do Rio das Almas são apresentadas graficamente na Figura 4.

Verifica-se que os valores de NSE de 0,72 para calibração e de 0,70 para a validação permitiram um ajuste das Qcalc em relação às Qobs que consegue simular as vazões dos dados hidrológicos observados.

Ainda é possível verificar que as vazões calculadas em escala diária conseguiram um maior ajuste para os períodos de vazões mínimas e não apresentam um ajuste tão correto nos eventos de cheia da bacia.

Para os dados de validação, em alguns períodos as vazões máximas calculadas pelo modelo excederam significativamente as vazões

observadas. Isso ocorre pois nestes períodos houve registro de precipitações elevadas, mas estas não

interferiram significativamente no escoamento registrado pela estação fluviométrica analisada.

Tabela 2: Parâmetros iniciais e otimizados usados na implementação do *Tank Model*.

Parâmetros	Diária		Mensal	
	Valores Iniciais	Valores Otimizados	Valores Iniciais	Valores Otimizados
h1	100	119,57	119,57	109,22
h2	50	23,26	23,26	0,00
h3	20	0,00	0,00	0,00
a1	10	0,09	0,09	1,00
a2	0,01	0,02	0,02	0,01
a3	0,001	0,01	0,01	0,01
b1	0,01	0,11	0,11	0,24
b2	0,0001	0,01	0,01	0,01
E	0,50	0,98	0,98	0,40
NSE Calibração		0,72		0,80
NSE Validação		0,70		0,78

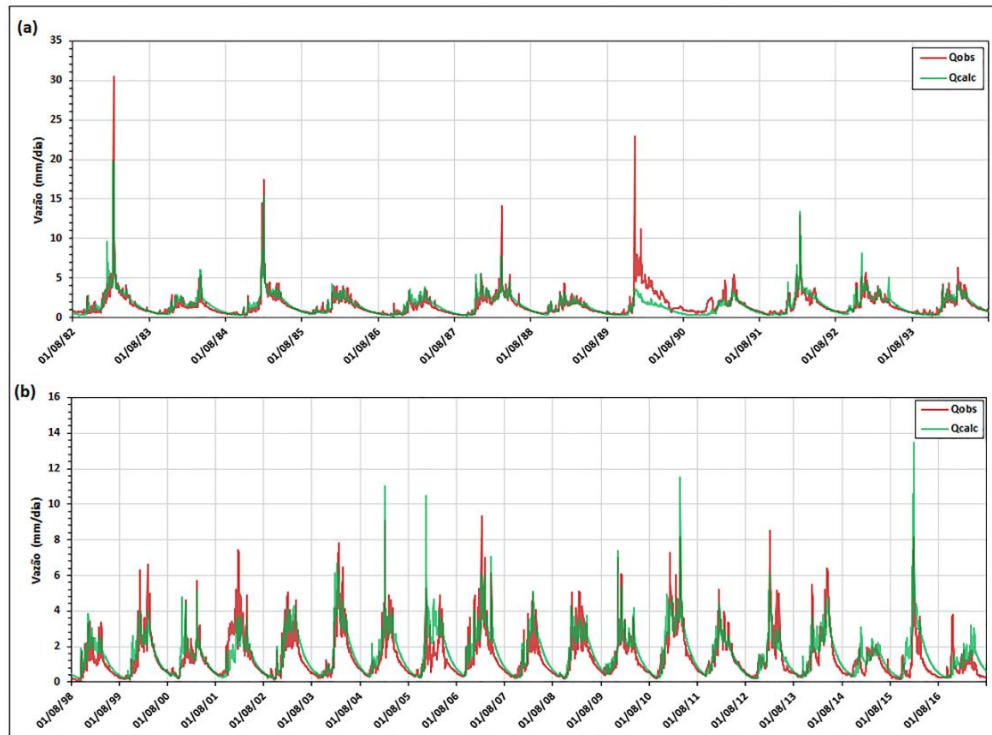


Figura 4. Comparação entre Qobs e Qcalc obtidas com o *Tank Model* em escala diária. (a) período de calibração e (b) período de validação do modelo.

Uma comparação entre as vazões reais (Qobs) e as vazões calculadas (Qcalc) por meio do *Tank Model* para a escala mensal dos dados da

Bacia Hidrográfica do Rio das Almas são apresentadas graficamente na Figura 5.

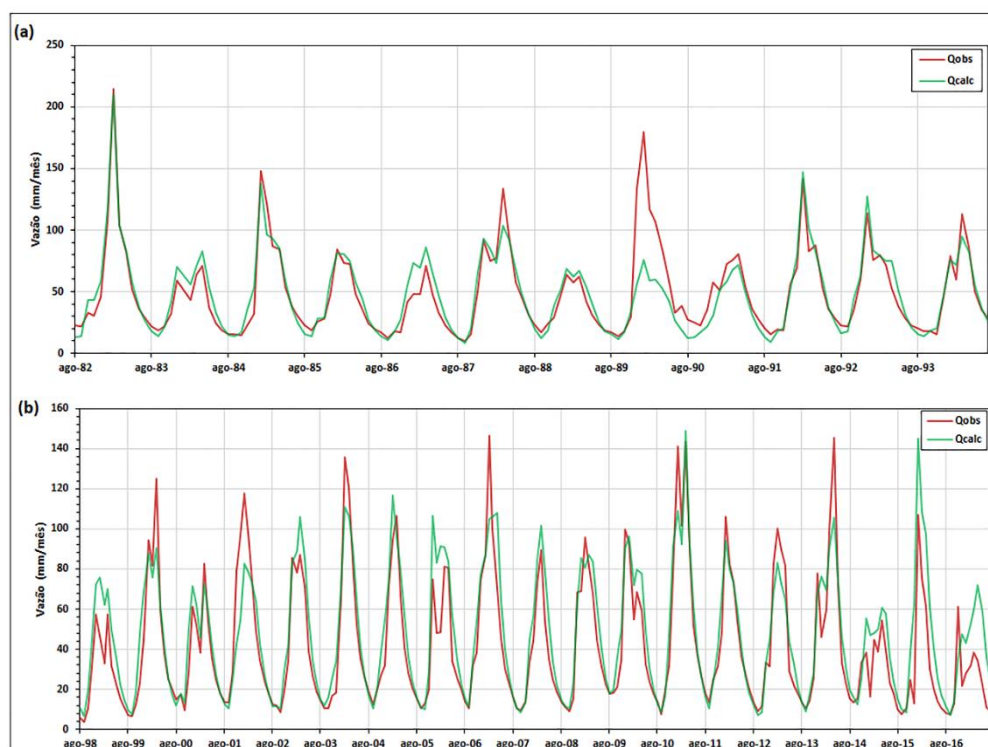


Figura 5. Comparação entre Qobs e Qcalc obtidas com o *Tank Model* em escala mensal. (a) período de calibração e (b) período de validação do modelo.

Os valores de NSE obtidos para a escala mensal foram de 0,80 para calibração e de 0,78 para validação. Através da análise da representação gráfica dos dados (Figura 5) percebe-se que, assim como na escala diária as Qcalc conseguem acompanhar a tendência das vazões dos dados hidrológicos, mas agora com mais precisão. Os dados mensais possibilitaram o alcance de um valor de NSE maior, consequentemente os dados de Qcalc se ajustaram melhor aos dados de Qobs.

Analisando a representação gráfica das vazões calculadas e observadas é possível notar que os dados em escala mensal possuem um maior

ajuste em relação aos dados em escala diário. Tal conclusão ainda é enfatizada pelos valores de NSE que são maiores para a escala mensal.

HyMOD

Os parâmetros iniciais e os parâmetros otimizados relacionados a implementação do *HyMOD* são demonstrados na Tabela 3. Os valores de NSE apresentados correspondem aos valores otimizados pela ferramenta *Solver* do *Excel*, consistindo no melhor valor de NSE encontrado para as respectivas escalas (diária ou mensal) após diversas rodagens do modelo.

Tabela 3: Parâmetros iniciais e otimizados usados na implementação do *HyMOD*.

Parâmetros	Diário		Mensal	
	Valores Iniciais	Valores Otimizados	Valores Iniciais	Valores Otimizados
Sm, MAX	200,00	1166,42	0,33	1666,55
β	1,00	0,32	0,42	0,39
α	0,50	0,37	0,05	0,32
Rf	0,10	0,02	0,05	0,02
Rs	0,01	0,14	0,18	0,08
NSE Calibração	0,67		0,75	
NSE Validação	0,72		0,83	

Os valores de NSE obtidos com a implementação do *HyMOD* na escala diária foram de 0,67 para calibração e de 0,72 para o período de validação. A Figura 6 apresenta uma comparação

gráfica das vazões calculadas (Qcalc) por meio do *HyMOD* e das vazões observadas (Qobs) da bacia hidrográfica do Rio das Almas para a escala diária.

Verifica-se que o ajuste dos dados para a escala diária conseguiu simular as tendências das

vazões mínimas e máximas que ocorreram na bacia durante o período analisado.

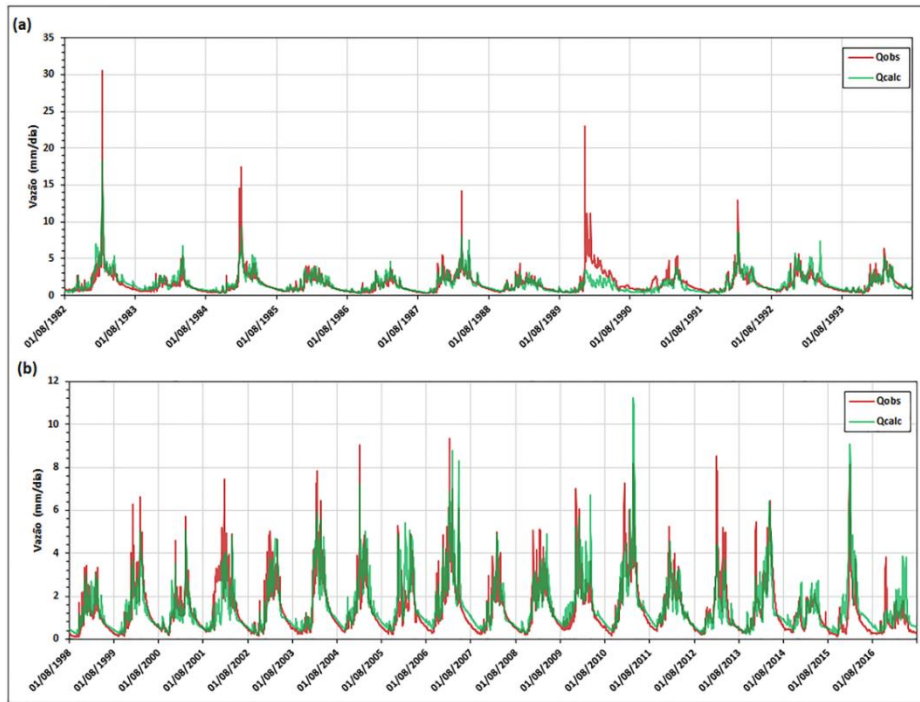


Figura 6. Comparação entre Qobs e Qcalc obtidas com o HyMOD em escala diária. (a) período de calibração e (b) período de validação do modelo.

Ainda é possível analisar na representação gráfica que, para a escala diária dos dados, o modelo teve dificuldade de acompanhar as vazões máximas da bacia em alguns casos

A Figura 7 apresenta a comparação entre os valores de vazão calculado (Qcalc) através do HyMOD e as vazões reais (Qobs) da bacia hidrográfica do Rio das Almas para a escala mensal.

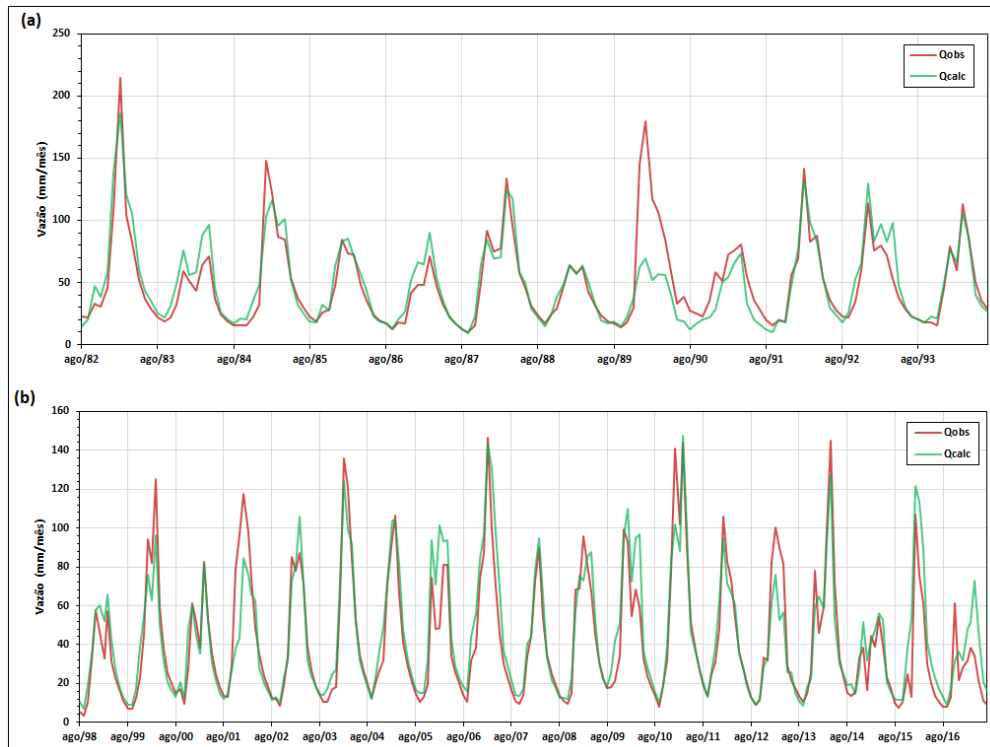


Figura 7: Comparação entre Qobs e Qcalc obtidas com o HyMOD em escala mensal. (a) período de calibração e (b) período de validação do modelo.

Os valores de NSE obtidos para a escala mensal foram de 0,75 para calibração e de 0,83 para o período de validação. Assim como no Tank Model a escala mensal possibilitou uma melhor otimização do NSE e um melhor ajuste das Qcalc com as Qobs.

Discussões

Com intuito de analisar comparativamente os resultados obtidos com a implementação dos

modelos hidrológicos para os dados da Bacia Hidrográfica do Rio das Almas, apresenta-se na Tabela 4 os valores de NSE encontrados para cada um dos modelos.

De acordo com as definições de Moriasi et al. (2007) e Lin et al. (2017) para interpretação dos valores de NSE verifica-se que ambos os modelos conseguiram alcançar NSEs considerados “bons” para a escala diária e “muito bons” para a escala mensal.

Tabela 4: Comparação entre os NSEs obtidos na implementação dos modelos.

	Tank Model		Hymod	
	Diário	Mensal	Diário	Mensal
NSE Calibração	0,72	0,80	0,67	0,75
NSE Validação	0,70	0,78	0,72	0,83

Analizando os valores de NSE na escala diária verifica-se que para o período de calibração o Tank Model conseguiu retornar um valor superior ao do HyMOD. Entretanto, para o período de validação o HyMOD conseguiu um melhor ajuste. O mesmo ocorre para a escala mensal, onde o Tank Model obteve um melhor ajuste para o período de calibração enquanto o HyMOD obteve um melhor ajuste para o período de validação.

Os valores de NSE obtidos com a utilização do Tank Model são condizentes com os valores encontrados em outros estudos. Meng et al. (2021) encontrou valores de NSE de 0,85 no período de calibração e 0,78 para o período de validação. No trabalho desenvolvido por Yang et al. (2021), os valores de NSE variaram entre 0,40 e 0,98 para ambos os reservatórios analisados em diferentes períodos. Estudo desenvolvido por Goodarzi et al. (2021a) verificou que o Tank Model retornou valores melhores de NSE para bacias de médio e grande porte (0,61 e 0,81 respectivamente). Enquanto Al-Asadi et al. (2020) obteve um valor de NSE de 0,81 para o período de calibração do modelo.

Com relação à utilização do HyMOD os valores encontrados para a bacia do Rio das Almas também se mostraram semelhantes aos encontrados em outros estudos. Bastola (2022) encontrou valores de NSE que variaram entre 0,48 e 0,88 para as 59 bacias hidrográficas analisadas. Nos estudos de Kim et al. (2022) os valores de NSE encontrados foram superiores a 0,80 para os períodos de validação e calibração. Enquanto que Meresa et al. (2022) analisaram 5 bacias hidrográficas e seus valores de NSE variaram entre 0,5 e 0,75.

A partir das representações gráficas de cada modelo para as escalas diárias e mensais é possível verificar que ambos os modelos foram capazes de acompanhar as tendências de vazão mínimas e máximas das Qobs. Entretanto, na análise gráfica das vazões diárias calculadas pelo *Tank Model* observa-se que os picos de cheias não foram representados integralmente, o que ocorre em menor grau para os resultados do HyMOD. Este comportamento também pode ser observado em trabalhos de Pereira et al. (2016), Al-Asadi et al. (2020), Campagnolo et al. (2021), podendo ocorrer devido a qualidade dos dados disponíveis e não necessariamente por uma falha no desempenho dos modelos.

Conclusão

Ambos os modelos implementados com os dados hidrológicos da bacia hidrográfica do Rio das Almas foram capazes de simular os dados de vazões considerando um período de 32 anos de dados de entrada.

A hipótese deste trabalho foi confirmada uma vez que os dois modelos obtiveram um coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NSE) classificados entre “bom” ou “muito bom”. Tais coeficientes de eficiência são evidenciados pelas representações gráficas que comparam as Qobs e Qcalc e demonstram que os valores simulados foram capazes de seguir a variabilidade da vazão da bacia hidrográfica do Rio das Almas em quase todos os casos.

Com isso, considerando os valores de NSE de validação obtidos para ambos os modelos e a análise das representações gráficas das Qcalc e

Qobs conclui-se que ambos os modelos puderam ser calibrados de maneira satisfatória para os dados de entrada da Bacia Hidrográfica do Rio das Almas. Entretanto o HyMOD demonstrou melhor desempenho pois conseguiu melhor flexibilidade no ajuste dos coeficientes NSE no período de validação e uma representação gráfica mais precisa se comparada ao *Tank Model*.

Dessa forma, os modelos hidrológicos conceituais Tank Model e HyMOD são capazes de simular as vazões para a bacia hidrográfica do Rio das Almas e produzirem informações que podem subsidiar tomada de decisões voltadas a ações de gestão de recursos hídricos da região

Agradecimentos

A primeira e segunda autoras agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior CAPES pelas bolsas de pesquisa e estudo concedidas.

Referências

- Al-Asadi, K., Abbas, A. A., Hamdan, A. N., 2020. Optimization of the Hydrological Tank Model by Downhill Simplex Method. *International Journal of Civil Engineering*, 18(12), 1433–1450. <https://doi.org/10.1007/s40999-020-00540-5>
- Bastola, S., 2022. The regionalization of a parameter of HYMOD, a conceptual hydrological model, using data from across the globe. *HydroResearch*, 5, 13–21. <https://doi.org/10.1016/j.hydres.2022.01.001>
- Beven, K., 2012. *Rainfall-Runoff Modelling: The Primer*. (2 ed.). <https://doi.org/10.1002/9781119951001>
- Boyle, D. P., Gupta, H. V., Sorooshian, S., 2000. Toward improved calibration of hydrologic models: Combining the strengths of manual and automatic methods. *Water Resources Research*, 36(12), 3663–3674. <https://doi.org/10.1029/2000WR900207>
- Brouziyne, Y., Abouabdillah, A., Chehbouni, A., Hanich, L., Bergaoui, K., McDonnell, R., Benaabidato, L., 2020. Assessing hydrological vulnerability to future droughts in a Mediterranean watershed: Combined indices-based and distributed modeling approaches. *Water (Switzerland)*, 12. <https://doi.org/10.3390/W12092333>
- Brouziyne, Y., Girolamo, A. M., Aboubdillah, A., Benaabidato, L., Bouchaou, L., Chehbouni, A., 2021. Modeling alterations in flow regimes under changing climate in a Mediterranean watershed: An analysis of ecologically-relevant hydrological indicators. *Ecological Informatics*, 61. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2021.101219>
- Campagnolo, K., Vasconcellos, S. M., Castiglio, V. S., Fagundes, M. R., Kobiyama, M., 2021. Aplicação do Tank Model como Ferramenta de Gestão na Bacia do Rio Perdizes - Cambará do Sul/RS. *Revista Brasileira de Geografia*, 14(2), 1143–1158. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v14.2.p1143-1158>
- Chabi, A., Zandagba, E. B. J., Obada, E., Biao, E. I., Alamou, E. A., Afouda, A., 2021. Impact of climate change on water availability in the Oueme catchment at the outlet of the Save's bridge (Benin, West Africa). *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 384, 255–260. <https://doi.org/10.5194/piahs-384-255-2021>
- Duan, Q., Schaake, J., Andréassian, V., Franks, S., Goteti, G., Gupta, H. V., Wood, E. F., 2006. Model parameter estimation experiment (MOPEX): an overview of science strategy and major results from the second and third workshops. *Journal of Hydrology*, 320(1–2), 3–17. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2005.07.031>
- Garg, V., Nikam, B. R., Thakur, P. K., Aggarwal, S. P., Gupta, P. K., Srivastav, S. K., 2019. Human-induced land use land cover change and its impact on hydrology. *HydroResearch*, 1, 48–56. <https://doi.org/10.1016/j.hydres.2019.06.001>
- Goodarzi, M. S., Amiri, B. J., Azarneyvand, H., Khazaei, M., Mahdianzadeh, N., 2021a. Assessing the Performance of a Hydrological Tank Model at Various Spatial Scales. *Journal of Water Management Modeling*, 29, 1–8. <https://doi.org/10.14796/JWMM.C472>
- Goodarzi, M. S., Amiri, B. J., Azarnivand, H., Waltner, I., 2021b. Watershed hydrological modelling in data scarce regions; integrating ecohydrology and regionalization for the southern Caspian Sea basin, Iran. *Heliyon*, 7(4), e06833. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06833>
- Hapsari, R. I., Syarifuddin, M., Putri, R. I., Novianto, D., 2021. Comparisons of distributed and lumped rainfall-runoff model for soil moisture estimation. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 930(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/930/1/012071>
- Horsburgh, J. S., Morsy, M. M., Castronova, A. M., Goodall, J. L., Gan, T., Yi, H., Stealey, M. J., Tarboton, D. G., 2016. HydroShare: Sharing Diverse Environmental Data Types and Models as Social Objects with Application to the Hydrology Domain. *Journal of the American Water Resources Association*, 52(4), 873–889. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12363>

- INMET, Instituto Nacional de Meteorologia., 2020. Banco de Dados Meteorológicos do INMET. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/>. Acesso em: 04/06/2021.
- Kagabu, M., Ide, K., Hosono, T., Nakagawa, K., Shimada, J., 2020. Describing coseismic groundwater level rise using tank model in volcanic aquifers, Kumamoto, southern Japan. *Journal of Hydrology*, 582(December 2019), 124464. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124464>
- Kheimi, M., Abdelaziz, S. M., 2022. A Daily Water Balance Model Based on the Distribution Function Unifying Probability Distributed Model and the SCS Curve Number Method. *Water (Switzerland)*, 14(2). <https://doi.org/10.3390/w14020143>
- Kim, K. B., Kwon, H. H., Han, D., 2022. Intercomparison of joint bias correction methods for precipitation and flow from a hydrological perspective. *Journal of Hydrology*, 604, 127261. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127261>
- Krause, P., Boyle, D. P., Base, F., 2005. Comparison of different efficiency criteria for hydrological model assessment. *Advances in Geosciences, European Geosciences Union*, 5, 89–97. <https://doi.org/10.5194 / adgeo-5-89-2005>
- Kwon, M., Kwon, H. H., Han, D., 2020. A hybrid approach combining conceptual hydrological models, support vector machines and remote sensing data for rainfall-runoff modeling. *Remote Sensing*, 12(11). <https://doi.org/10.3390/rs12111801>
- Lich, N., 2001. The benefits of replacing LP solvers in basin allocation models with a generalized non-linear evolutionary network flow solver (SFEP). In *Bridging the Gap: Meeting the World's Water and Environmental Resources Challenges*. (pp. 1–20).
- Lin, F., Chen, X., Yao, H., 2017. Evaluating the use of Nash-Sutcliffe efficiency coefficient in goodness-of-fit measures for daily runoff simulation with SWAT. *Journal of Hydrologic Engineering*, 22(11). [https://doi.org/10.1061 / \(ASCE\) HE.1943-5584.0001580](https://doi.org/10.1061 / (ASCE) HE.1943-5584.0001580)
- Meng, X., Huang, M., Liu, D., Yin, M., 2021. Simulation of rainfall–runoff processes in karst catchment considering the impact of karst depression based on the tank model. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(4). <https://doi.org/10.1007/s12517-021-06515-7>
- Meresa, H., Tischbein, B., Mekonnen, T., 2022. Climate change impact on extreme precipitation and peak flood magnitude and frequency: observations from CMIP6 and hydrological models. In *Natural Hazards (Vol. 111, Issue 3)*. Springer Netherlands. <https://doi.org/10.1007/s11069-021-05152-3>
- Moore, R. J., 1985. The probability-distributed principle and runoff production at point and basin scales. *Hydrological Sciences Journal*, 30(2), 273–297. <https://doi.org/10.1080/02626668509490989>
- Moraes, M. R. B., 2016. Modelagem da vazão na Bacia Hidrográfica do Rio Araguari, em Minas Gerais. (Mestrado em Qualidade Ambiental), Universidade Federal de Uberlândia, MG.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Liew, M. W. Van, Bingner, R. L., Harmel, R. D., Veith, T. L., 2007. Model evaluation guidelines for systematic Quantification of accuracy in watershed simulations. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 50(3), 885–900. <https://doi:10.13031/2013.23153>
- Nash, J. E. E., Sutcliffe, J. V., 1970. River Flow Forecasting Through Conceptual Models Part I - A Discussion of Principles. *Journal of Hydrology*, 10(3), 282–290. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(70\)90255-6](https://doi.org/10.1016/0022-1694(70)90255-6)
- Negewo, T. F., Sarma, A. K., 2021. Estimating Water Production under Baseline and Future Climate Change Scenarios in the Genale Basin, Genale Dawa River Basin, Ethiopia, Using SWAT Model. *Journal of Hydrologic Engineering*, 26(3). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0002047](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0002047)
- Odongo, V. O., Oel, P. R., Tol, C., Su, Z., 2019. Impact of land use and land cover transitions and climate on evapotranspiration in the Lake Naivasha Basin, Kenya. *Science of The Total Environment*, 682, 19–30. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.04.062>
- Papadaki, C., Dimitriou, E., 2021. River flow alterations caused by intense anthropogenic uses and future climate variability implications in the balkans. In *Hydrology*. (Vol. 8, Issue 7). <https://doi.org/10.3390/hydrology8010007>
- Pereira, T. S. R., Almeida dos Santos, K., Ferreira da Silva, B., Teodomiro Martins Formiga, K., Kepler Soares, A., 2016. Desenvolvimento De Um Modelo Chuva-Vazão Via Tank Model E Calibração Automática. *REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil*, 11(3), 17–28. <https://doi.org/10.5216/reec.v11i3.36007>
- Qiu, J., Yang, Q., Zhang, X., Huang, M., Adam, J. C., Malek, K., 2019. Implications of water management representations for watershed hydrologic modeling in the Yakima River basin. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(1), 35–49. <https://doi.org/10.5194 / hess-23-35-2019>
- Quan, Z., Teng, J., Sun, W., Cheng, T., Zhang, J.,

2015. Evaluation of the HYMOD model for rainfall-runoff simulation using the GLUE method. IAHS-AISH Proceedings and Reports, 368(August 2014), 180–185. <https://doi.org/10.5194/piahs-368-180-2015>
- Satgé, F., Pillot, B., Roig, H., & Bonnet, M. P., 2021. Are gridded precipitation datasets a good option for streamflow simulation across the Juruá river basin, Amazon? Journal of Hydrology, 602(August). <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126773>
- Shende, S., 2021. A conceptual rainfall-runoff mathematical model to simulate runoff using daily amount of rainfall for arid and semi-arid region. Journal of Physics: Conference Series, 1964(2). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1964/2/022017>
- Sitterson, J., Knightes, C., Parmar, R., Wolfe, K., Muche, M., Avant, B., 2018. An Overview of Rainfall-Runoff Model Types. US Environmental Protection Agency, Washington, DC, USA.
- Smith, P. J., Beven, K. J., Tawn, J. A., 2008. Detection of structural inadequacy in process-based hydrological models: A particle-filtering approach. Water Resources Research, 44(1), 1–11. <https://doi.org/10.1029/2006WR005205>
- SNIRH - Sistema Nacional de Recursos Hídricos., 2020. Séries Históricas. Agência Nacional Das Águas.Disponível em: <https://www.snirh.gov.br/>. Acesso em: 07/06/2021.
- Sood, A., Smakhtin, V., 2015. Global hydrological models: a review. Hydrological Sciences Journal, 60(4), 549–565. <https://doi.org/10.1080/02626667.2014.950580>
- Sugawara, M., 1995. Tank model code. In Computer models of watershed hydrology; Singh, V.P.,Water Resources Publications: Berlin/Heidelberg, Germany, pp. 353-361.
- Sugawara, M., Fuyuki, M., 1956. A Method of Revision of River Discharge by Means of a Rainfall Model. In: A Collection of Research Papers about Forecasting Hydrologic Variables; The Geosphere Research Institute of Saitama University: Saitama, Japan. pp 14–18.
- Suryoputro, N., Suhardjono, Soetopo, W., Suhartanto, E., 2017. Calibration of infiltration parameters on hydrological tank model using runoff coefficient of rational method. AIP Conference Proceedings, 1887. <https://doi.org/10.1063/1.5003539>
- Wagener, T., 1998. Developing a Knowledge-based system to support rainfall-runoff modelling. University of Technology. <https://doi.org/10.1590/2318-0331.252020190106>
- Wagener, T., Boyle, D. P., Lees, M. J., Wheater, H. S., Gupta, H. V., Sorooshian, S., 2001. A framework for development and application of hydrological models. Hydrology and Earth System Sciences, 5(1), 13–26. <https://doi.org/10.5194/hess-5-13-2001>
- Yang, Y., Liu, R., Hong, Y., Zhang, L., Cui, S., Luo, Y., Nie, W., 2021. Development of Modified Tank Model for Reservoir Storage Prediction: Case Study of Huanggang Reservoir, Fujian, China. Journal of Hydrologic Engineering, 26(7), 1–9. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)he.1943-5584.0002093](https://doi.org/10.1061/(asce)he.1943-5584.0002093)
- Zhang, L., Cheng, L., Chiew, F., Fu, B., 2018. Understanding the impacts of climate and landuse change on water yield. Current Opinion in Environmental Sustainability, 33, 167–174. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2018.04.017>
- Zhang, S., Al-Asadi, K., 2019. Evaluating the effect of numerical schemes on hydrological simulations: HYMOD as A case study. Water (Switzerland), 11(2), 1–20. <https://doi.org/10.3390/w11020329>