

Aplicação da ferramenta EVALHID para calibração de parâmetros e simulação de vazões no alto curso do rio Araguari, Minas Gerais

Application of the EVALHID tool for parameter calibration and flow simulation in the upper course of Araguari river, Minas Gerais

Marcio Ricardo Salla

Faculdade de Engenharia Civil - Universidade Federal de Uberlândia, Avenida João Naves de Ávila, 2121 - Campus Santa Mônica - Bloco 1Y
CEP 38408-098 - Uberlândia, Minas Gerais, Brasil - mrsalla@feciv.ufu.br

Javier Paredes Arquiola, Néstor Lerma Elvira

Ingeniería Hidráulica Y Medio Ambiente - Universidad Politécnica de Valencia, Ciudad Politécnica de la Innovación, Camino de Vera, s/n, 46022
Valencia, España - jparedea@hma.upv.es; neslerel@upv.es

José Eduardo Alamy Filho, Carlos Eugênio Pereira e Emiliano Silva Costa

Faculdade de Engenharia Civil - Universidade Federal de Uberlândia- Uberlândia, Minas Gerais, Brasil
zealamy@yahoo.com.br; carloseugenio@feciv.ufu.br; emilianocosta@mestrado.ufu.br

Recebido: 07/02/14 - Revisado: 10/02/14 - Aceito: 09/07/14

RESUMO

No planejamento e gestão de recursos hídricos, são fundamentais e complementares as operações contínuas em estações de monitoramento fluviométrico e a modelagem chuva-vazão. A presença de centrais hidrelétricas na bacia hidrográfica do rio Araguari é um dos fatores que indica a importância de se prever as vazões dos rios a partir do uso de modelos chuva-vazão com parâmetros locais devidamente calibrados. O reservatório da usina hidrelétrica de Nova Ponte regulariza o fluxo em cascata, a fim de otimizar a produção de energia e garantir as demandas superficiais. Esta nota técnica discorre sobre a aplicação da ferramenta computacional EVALHID na modelagem chuva-vazão em quatro sub-bacias situadas a montante do reservatório Nova Ponte. Utilizou-se uma adaptação em Visual Basic do algoritmo Shuffled Complex Evolution method - University of Arizona (SCE-UA) na autocalibração dos parâmetros dos modelos Témez e Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning (HBV) a partir de uma função objetivo. Foram consideradas três sub-bacias contribuintes a três postos fluviométricos, além do agrupamento de sub-bacias contribuintes ao posto fluviométrico localizado no ponto de aflúncia do rio Quebra-Anzol ao reservatório de Nova Ponte. Os melhores ajustes das vazões observadas e simuladas ocorreram nas sub-bacias não agrupadas. Nestas, a função F_{med} ficou acima de 0,8 para o modelo Témez e próxima a 0,7 para o modelo HBV. A discrepância da relação Q_{max}/Q_{min} anual nas sub-bacias não agrupadas está relacionada com a capacidade de armazenamento de água no solo H_{max} (no modelo Témez) e com o limite máximo de fluxo subsuperficial L_{max} (no modelo HBV). Os bons ajustes das vazões, nos meses de poucas chuvas, credenciam tais modelos hidrológicos para serem incorporados na análise de conflitos de uso da água superficial, os quais são potencializados nos períodos de estiagem.

Palavras Chave: EVALHID. Modelo Témez. Modelo HBV. Rio Araguari

ABSTRACT:

Continuous monitoring operations of fluvimetric stations and rainfall-runoff modeling are essential and complementary in the planning and management of water resources. The presence of hydroelectric dams in the basin of Araguari river is a factor that indicates the importance of predicting river flows by using rainfall-runoff models with duly calibrated local parameters. The Nova Ponte reservoir regulates the waterfall flow to optimize hydroelectric production and ensure surface demands. This technical note discusses the application of the EVALHID computational tool in the rainfall-runoff modeling in four sub-basins located upstream of the Nova Ponte reservoir. We used an adaptation in Visual Basic of the Shuffled Complex Evolution method algorithm - University of Arizona (SCE-UA), for the self-calibration of the parameters of Témez and Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning (HBV) models through an F_{media} objective function. Three sub-basins contributing to three fluvimetric stations were considered, in addition to the grouping of sub-basins contributing to the fluvimetric station located at the point of confluence of the river to the Nova Ponte reservoir. The best fitting of the observed and simulated flows occurred in non grouped basins. In these, the F_{media} function was above 0.8 for the Témez model and close to 0.7 for the HBV model. The discrepancy of the annual Q_{max}/Q_{min} ratio in non grouped basins is related to the storage capacity of the soil water H_{max} (in the Témez model) and the maximum subsurface flow L_{max} (the HBV model). The good fits of the flow, in the low rainfall months, accredit such hydrological models for incorporation of the analysis of surface water use conflicts, which are enhanced during drought periods.

Keywords: EVALHID. Témez model. HBV model. Araguari river

INTRODUÇÃO

Os múltiplos usos da água, sejam para fins consuntivos ou não consuntivos, geram conflitos de interesses sociais, econômicos e políticos em escalas local, regional e nacional, onde a outorga de direito de uso tende a ajustar demandas e disponibilidades para usos atuais e futuros desse recurso natural (OLIVEIRA et al., 2013).

O planejamento e gestão de recursos hídricos dependem de uma eficiente avaliação dos fluxos superficiais e subterrâneos, incluindo confiabilidade na predição de vazões. Para isto, são fundamentais e complementares as operações contínuas em estações de monitoramento fluviométrico e a modelagem chuva-vazão.

Com base na literatura da área, a quantidade de ferramentas computacionais suportes na transformação de precipitação em vazão de cursos de água superficiais é considerável, com níveis distintos de complexidade matemática na representação do escoamento superficial, subsuperficial e de base. A grande quantidade de ferramentas permite ao usuário escolher a melhor alternativa ao seu propósito (PAREDES-ARQUIOLA et al., 2011).

Os modelos hidrológicos conceituais mais utilizados podem ser encontrados em publicações clássicas, como: Tézé - Tézé (1977), HBV- Bergström (1995), SCS -Cronshey et al., (1986), Sacramento - Burnash et al. (1973), SWM - Stanford Watershed Model - Linsley e Crawford (1966), HEC-HMS - Feldman (2000), IPH II -Tucci et al. (1981), Topmodel - Beven, (1997), SWMM - Storm Water Management Model - Huber et al. (1975), entre outros.

A mesorregião do Triângulo Mineiro possui enorme potencial hidrelétrico e acentuada demanda por irrigação, na qual a implementação de modelos chuva-vazão dos mais variados níveis de complexidade são fundamentais para a adequada avaliação quali/quantitativa dos recursos hídricos.

Na bacia hidrográfica do Rio Araguari, existem diversas centrais hidrelétricas com reservatórios em cascata. O reservatório de usina de Nova Ponte regulariza o fluxo em cascata, a fim de otimizar a produção hidrelétrica e garantir as demandas superficiais outorgadas. Sendo assim, torna-se imprescindível prognosticar os fluxos superficial e subterrâneo nas sub-bacias hidrográficas afluentes a este reservatório. Neste artigo, foram avaliadas as vazões em quatro sub-bacias localizadas a montante do reservatório de Nova Ponte, utilizando os modelos chuva-vazão Tézé e HBV, ambos associados à ferramenta computacional EVALHID.

Diversos trabalhos da literatura demonstram que existe uma grande discrepância entre os valores dos parâmetros calibrados pelos modelos Tézé e HBV, justamente pelas distintas características das bacias hidrográficas estudadas, tais como o uso e ocupação do solo, declividade do solo, forma da bacia hidrográfica, configuração da rede de drenagem natural, etc. Dentre estes trabalhos, destacam-se os realizados por García et al. (2012) na bacia do rio Grande Morelia (México), Pizarro et al. (2005) na bacia do rio Purapel (Chile) e Maidment e Tarboton (2013) na bacia hidrográfica do rio Blando (Espanha).

De acordo com Paredes-Arquiola et al. (2011) e Mas

(2013), “a ferramenta EVALHID permite o desenvolvimento de modelos precipitação-vazão em bacias hidrográficas complexas, escolhidas em função dos dados disponíveis, da complexidade da bacia hidrográfica e da experiência do usuário no desenvolvimento e calibração de modelos hidrológicos”.

Ferramenta EVALHID

A ferramenta EVALUACIÓN de los recursos HIDRICOS (EVALHID) é um programa computacional que possibilita, através de diversos modelos chuva-vazão, a avaliação dos recursos hídricos em uma ou várias bacias hidrográficas simultaneamente e com modelos variados. A ferramenta foi desenvolvida por Paredes-Arquiola et al. (2011) e integra seis modelos chuva-vazão (Tézé, HBV, Sacramento, GR2M, GR4J e AWBM), todos do tipo agregado com aplicação semidistribuída, o que significa que a bacia hidrográfica é dividida em sub-bacias. Em cada sub-bacia pode-se escolher um modelo disponibilizado pelo programa (PAREDES-ARQUIOLA et al., 2011; MAS, 2013).

Nesta nota técnica, foram utilizados os modelos Tézé e HBV, em função dos dados hidrológicos disponíveis na região de estudo e do reduzido número de parâmetros a calibrar.

Modelo Tézé

O modelo Tézé de Tézé (1977) é um modelo de quatro parâmetros, com uma larga trajetória de aplicação na Europa e América Latina, para a avaliação de recursos hídricos (PIZARRO et al., 2005; MURILLO; NAVARRO, 2011; BAEZA, 2011; GIMÉNEZ, 2012; GARCÍA et al., 2012; MAIDMENT; TARBOTON, 2013). Todo o processo é governado pelo princípio da continuidade e de balanço de massa em escala mensal, com aplicação limitada às bacias hidrográficas que possuem certa homogeneidade climática e geológica. Para sua aplicação em bacias hidrográficas maiores, é necessário realizar a subdivisão em sub-bacias, onde o modelo pode funcionar como semi-agregado. O modelo considera o terreno dividido em zona superior (não saturada) e zona inferior (saturada) que deságua na rede de drenagem superficial. No balanço de massa, são considerados o fluxo de entrada (precipitação P), fluxos de saída (evapotranspiração real ET_{real} , saída superficial S_{sup} e saída subterrânea S_{sub}), fluxo intermediário (infiltração I , identificada pela recarga R_i de aquífero durante um tempo t menor que o período mensal de simulação) e armazenamentos intermediários (umidade do solo H_t e volume armazenado no aquífero V_a), conforme esquema ilustrado na Figura 2.

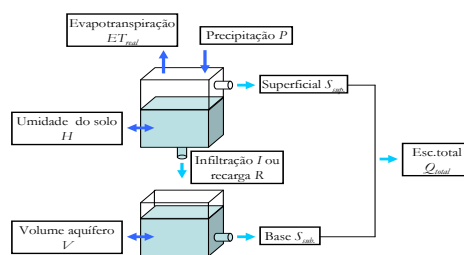


Figura 2 - Esquema dos tanques na estimativa do escoamento total por meio do modelo Tézé

Na sequência, são apresentadas as equações de estado que regulam o ciclo hidrológico.

- da precipitação total P_t , a porção não armazenada no solo é considerada como excedente (T_t), representada pela Equação (1) a (3).

$$T_t = 0; \text{ se } P_t \leq P_o$$

$$T_t = (P_t - P_o)^2 / (P_t - \delta_t - 2P_o); \text{ se } P_t > P_o \quad (1)$$

$$\delta_t = H_{m\acute{a}x} - H_{t-1} + ETP_t \quad (2)$$

$$P_o = C \cdot (H_{m\acute{a}x} - H_{t-1}) \quad (3)$$

em que $H_{m\acute{a}x}$ é a capacidade máxima de armazenamento do solo, que depende da textura, declividade do terreno e espessura do solo onde ocorre a evapotranspiração (L), H_{t-1} é o armazenamento do solo no tempo t-1 (L), ETP_t é a evapotranspiração potencial no tempo t (L), C é um fator adimensional que permite obter um valor limite de precipitação inicial P_o a partir do déficit de umidade do solo ($H_{m\acute{a}x} - H_{t-1}$), P_t é a precipitação total (L), T_t é a porção não armazenada no solo (L) e δ_t é o déficit máximo de umidade do solo (L);

- a porção armazenada na parte superior do solo H_p , que depende das condições de armazenamento no tempo t-1 (H_{t-1}), é representada pela Equação (4).

$$H_t = \acute{m}ax\{0; H_{t-1} + P_t - T_t - ETP_t\} \quad (4)$$

- a evapotranspiração real ET_{real} é representada pela equação (5). Sempre que existe umidade na parte superior do solo, ocorrerá a ET_{real} até alcançar o limite da evapotranspiração ETP ;

$$ET_{real} = \acute{m}in\{H_{t-1} + P_t - T_t; ETP_t\} \quad (5)$$

- a infiltração I_t corresponde à fração que recarrega o aquífero e, portanto, é o excedente que não esco superficialmente. Depende do excedente T_t e de um parâmetro denominado infiltração máxima ($I_{m\acute{a}x}$), conforme equação (6).

$$I_t = I_{m\acute{a}x} \cdot T_t / (T_t + I_{m\acute{a}x}) \quad (6)$$

- A saída superficial S_{sup} (L/T) é expressa pela Equação (7). A vazão cedida ao escoamento superficial Q_t é diretamente proporcional ao volume armazenado V_p , conforme Equação (8).

$$S_{sup} = T_t - I_t \quad (7)$$

$$Q_t = S_{sup} \cdot A_{sub} = a \cdot V_t \quad (8)$$

em que A_{sub} é a área interfacial entre a região não saturada e a saturada (L²), a é uma constante que relaciona o volume armazenado no aquífero com a vazão fornecida ao escoamento superficial (1/T);

- Na obtenção da equação final de V_t aplica-se o balanço

de massa no aquífero, resultando na Equação (9).

$$I_t - Q_t = dV_t / dt; I_t = R_t$$

$$R_t - a \cdot V_t = dV_t / dt; \text{ (para } t = 0, V_t = V_0 \text{ e } R_t \text{ constante)}$$

$$V_t = V_0 \cdot \exp^{-at} + (R_t/a) \cdot (1 - \exp^{-at}); \quad R_t = A_{sub} \cdot I_t$$

$$V_t = V_{t-1} \cdot \exp^{-a \cdot \Delta t} + (S \cdot I_t/a) \cdot (1 - \exp^{-a \cdot \Delta t}) \quad (9)$$

em que V_{t-1} é o volume armazenado no tempo t-1 (L³), R_t é a recarga no tempo t (L³/T) e S é a área de fundo da zona superior (L²).

Com isso, no modelo Témez, é preciso ajustar apenas os parâmetros $H_{m\acute{a}x}$, C , $I_{m\acute{a}x}$ e a . Os parâmetros $H_{m\acute{a}x}$ e C regulam o armazenamento de água no solo, $I_{m\acute{a}x}$ reparte o escoamento superficial do subterrâneo e o parâmetro a controla a drenagem subterrânea. Como condições iniciais de simulação, a umidade inicial do solo H_0 e do armazenamento do aquífero V_0 são adotados, cujos efeitos são rapidamente abatidos no decorrer da simulação.

Modelo HBV

O modelo HBV model de Bergström (1995) pertence a uma gama de modelos que utilizam os processos mais importantes integrantes ao escoamento superficial por meio de uma estrutura simples e com oito parâmetros, que trabalham com escala temporal diária ou mensal e que utilizam, como dados de entrada, as séries de precipitação, temperatura do ar e evapotranspiração média mensal. Este modelo foi originalmente desenvolvido pelo Instituto Meteorológico e Hidrológico Sueco (SMHI) para prever o escoamento afluente às centrais hidrelétricas (BERGSTROM, 1995). Ainda que a estrutura principal do modelo tenha sido mantida, existem algumas versões adaptadas que evidenciam a elevada aceitação em diversos países (HUNDECHA; BARDOSY, 2004; SEIBERT, 2005; ABEBE et al., 2010; DAKHLAOUI et al., 2012; JIA; SUN, 2012).

Adequando-se à realidade brasileira, o modelo engloba três módulos principais: um de precipitação efetiva e umidade do solo, um de evapotranspiração e outro de estimativa de escoamento (soma dos escoamentos superficial, sub-superficial e de base), conforme esquema ilustrado na Figura 3.

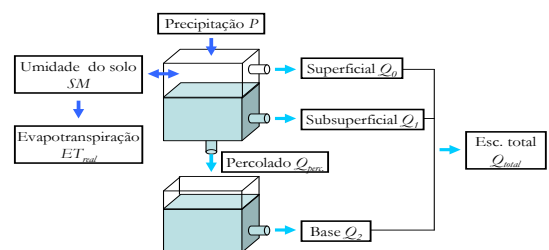


Figura 3 - Esquema dos tanques para estimar o escoamento total por meio do modelo HBV

Na sequência, enfatizam-se as equações de estado para os módulos.

- A precipitação efetiva P_{ef} ou escoamento superficial depende da umidade do solo no momento da precipitação, obtida por meio da equação (10).

$$P_{ef} = (SM/FC)^\beta \cdot P \quad (10)$$

em que SM é a umidade do solo (L), FC é a máxima capacidade de armazenamento do solo (L), P é a precipitação mensal (L) e β é um parâmetro de ajuste do modelo (-);

- No módulo de evapotranspiração relaciona-se a umidade do solo SM e a evapotranspiração real ET_{real} por meio de um parâmetro de saturação do solo PWP , conforme Equação (11).

$$ET_{real} = ETP, \text{ se } SM \geq PWP$$

$$ET_{real} = ETP \cdot (SM/PWP), \text{ se } SM < PWP \quad (11)$$

- De acordo com a Figura 3, a vazão total Q_{total} é obtida pela soma do escoamento superficial (Q_0), sub-superficial (Q_1) e de base (Q_2), representadas pela Equações (12) a (15).

$$Q_0 = 0, \text{ se } S_1 \leq L$$

$$Q_0 = k_0 \cdot (S_1 - L_{m\acute{a}x}) \cdot A, \text{ se } S_1 > L_{m\acute{a}x} \quad (12)$$

$$Q_1 = k_1 \cdot S_1 \cdot A \quad (13)$$

$$Q_{perc} = k_{perc} \cdot S_1 \cdot A \quad (14)$$

$$Q_2 = k_2 \cdot S_2 \cdot A \quad (15)$$

em que k_0 é o coeficiente do escoamento superficial (1/T), k_1 é o coeficiente do escoamento subsuperficial (1/T), k_2 é o coeficiente do escoamento base (1/T), k_{perc} é o coeficiente de percolação (1/T), S_1 é o nível líquido no reservatório superior (L), S_2 é o nível líquido no reservatório inferior (L), L é o fluxo subsuperficial (L), $L_{m\acute{a}x}$ é o limite máximo de fluxo subsuperficial (L) e A é a área da bacia hidrográfica (L²).

O modelo HBV contempla o ajuste de oito parâmetros: k_0 , k_1 , k_2 , k_{perc} , $L_{m\acute{a}x}$, PWP , FC e β . Como condições iniciais de simulação, a umidade inicial do solo H_0 , S_1 e S_2 , no tempo inicial, são fatores que devem ser adotados.

ESTUDO DE CASO

Este item descreve a área de estudo, a ferramenta EvalHid e os modelos hidrológicos utilizados, a origem dos dados de entrada e os resultados das calibrações dos parâmetros e validação da modelagem.

Área de estudo

A bacia hidrográfica do Rio Araguari está localizada na

região Oeste do Estado de Minas Gerais, entre as coordenadas 18°20' e 20°10' latitude Sul e 46°04' e 48°42' longitude Oeste. A nascente encontra-se no Parque Nacional da Serra da Canastra, no município de São Roque de Minas, e percorre 475 km até a sua foz no Rio Paranaíba, o qual integra a Bacia Transnacional do Rio Paraná. A bacia do Rio Araguari possui uma área de aproximadamente 22 mil km², formada por dezoito sub-bacias, com população residente de aproximadamente 1,2 milhões de habitantes, distribuída em dezoito municípios. De acordo com o Comitê de Bacia Hidrográfica do Rio Araguari, os principais usos de água advêm de consumo humano, irrigação, mineração, aquicultura, dessedentação de animais, produção hidroeétrica e turismo. As quatro sub-bacias hidrográficas estudadas nesta nota técnica (Ribeirão Grande, Rio São João, Rio Misericórdia e Alto Rio Quebra-Anzol) possuem uma área total de 4925,66 km² e situam-se a montante do reservatório de regularização de Nova Ponte, conforme ilustra a Figura 1.

Dados de entrada

Os dados de entrada temporais para cada sub-bacia incluem a precipitação, evapotranspiração potencial e área de drenagem.

No presente trabalho, utilizou-se uma escala mensal, com períodos variados em função da disponibilidade de dados históricos, cujo período mínimo foi de 12 anos (janeiro de 2000 até dezembro de 2012) e o máximo de 33 anos (janeiro de 1981 até dezembro de 2012). Neste artigo, de acordo com a Figura 4, devido ao posicionamento dos postos fluviométricos utilizados no processo de calibração dos parâmetros, as sub-bacias descritas na Figura 1 foram delimitadas de acordo com as áreas de contribuição aos postos fluviométricos ilustrados na Figura 4. Com isto, a sub-bacia do Rio São João foi denominada sub-bacia 1, a sub-bacia do Rio Misericórdia foi denominada sub-bacia 2, a cabeceira do Alto Rio Quebra-Anzol foi denominada sub-bacia 3 e, para finalizar, a área compreendida pela sub-bacia do Ribeirão Grande e trecho do Alto Rio Quebra-Anzol (entre os postos fluviométricos 60250000 e 60280000) foi denominada sub-Bacia 4.

A Tabela 1 indica os códigos e instituições responsáveis pelas operações das estações de monitoramento pluviométrico, fluviométrico e de evapotranspiração potencial utilizadas em cada uma das quatro sub-bacias definidas na Figura 4, além das correspondentes áreas de drenagem e vazões outorgadas consideradas.

Tabela 1 - Códigos e instituições responsáveis pelas operações das estações de monitoramento, áreas de drenagem e vazões outorgadas. Com relação aos dados históricos de precipitação, as ausências de registros em meses variados foram preenchidas por método estatístico de regressão linear simples, no qual correlacionam-se os dados de precipitação falhos de um posto de monitoramento, com dados de um posto vizinho.

Para cada sub-bacia, os dados de precipitação e evapotranspiração potencial foram estimados por meio da interpolação de dados vizinhos, obtidos nas estações listadas na Tabela 1, ao centróide de cada sub-bacia, utilizando a função inverso do quadrado da distância entre os dados vizinhos e o centróide.

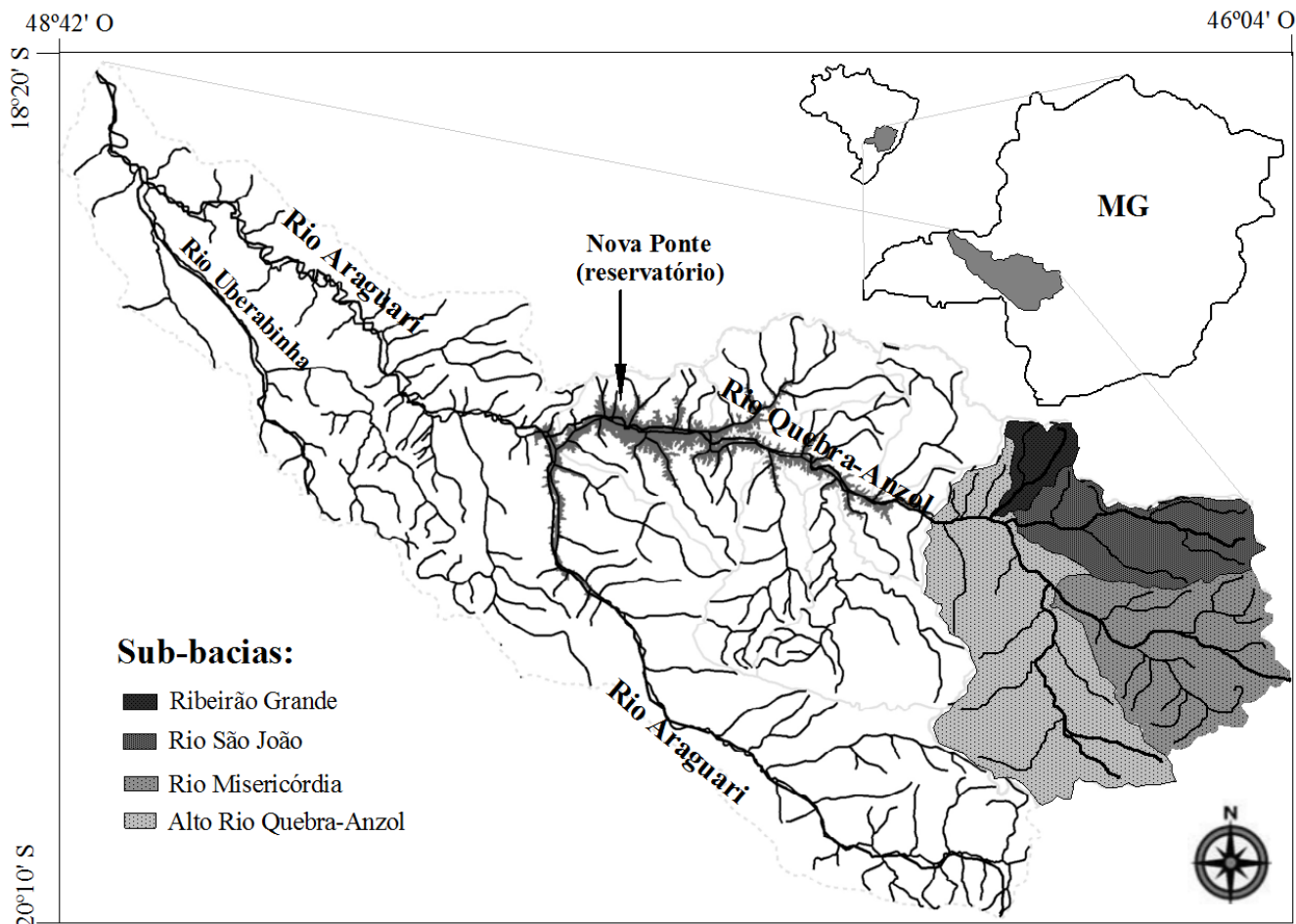


Figura 1 - Área de estudo.

Tabela 1 - Códigos e instituições responsáveis pelas operações das estações de monitoramento, áreas de drenagem e vazões

Estações		Sub-bacia			
		1	2	3	4
Pluviométricas	Códigos	1946004, 1946009, 1946018 e 1946022	1946004, 1946007, 1946009 e 1946010	1946007, 1946010, 1946011 e 1946019	1946004, 1946007, 1946008, 1946018, 1946019, 1947006 e 1947007
	Operadora	ANA			
Fluviométricas	Códigos	60270000	60265000	60250000	60280000
	Operadora	ANA			CEMIG
Evapotranspiração	Códigos	83531, 83570, 83579 e 83582			
	Operadora	INMET			
Área de drenagem (km ²)		962,12	1411,23	1330,09	1222,22
Vazões outorgadas hm ³ /mês	Operadora	SUPRAM/IGAM			
	Valor	19,20	7,95	2,53	3,14

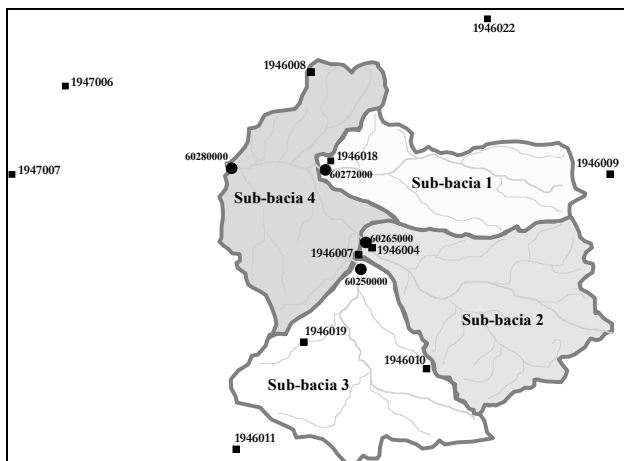


Figura 4 - Delimitação das sub-bacias e posicionamento dos postos fluviométricos (●) e pluviométricos (■).

Calibração e validação da modelagem

Os parâmetros dos modelos chuva-vazão Têmez e HBV foram calibrados através do algoritmo evolutivo de calibração SCE-UA (*Shuffled Complex Evolution method, University of Arizona*). Para isto, as séries temporais de vazão obtidas na ferramenta EVALHID foram comparadas com as séries temporais de vazão observadas e, através de uma adaptação em *Visual Basic* do algoritmo SCE-UA, procedeu-se a autocalibração. Este algoritmo foi desenvolvido por Duan et al. (1992) e foi

utilizado com êxito na resolução de problemas não lineares em diversas aplicações de modelos hidrológicos em escala de bacia hidrográfica (PAREDES ARQUIOLA et al., 2011). O algoritmo SCE-UA avalia grande quantidade de combinações de valores de parâmetros para encontrar o melhor ajuste entre os dados observados e simulados. Neste estudo, realizaram-se os ajustes maximizando-se o valor médio encontrado de quatro funções objetivo, denominado, neste artigo, como $F_{média}$. Estas funções equacionam o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (NS), o coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe da transformação logarítmica da vazão (ln NS), o coeficiente de correlação de Pearson e a medida da simetria do ajuste entre a simulação média e a observação média. O ajuste perfeito é alcançado quando $F_{média} = 1,0$.

O período utilizado para as calibrações variou de acordo com a disponibilidade de dados observados de vazão, a saber: nas sub-bacias 2 e 3, foram realizadas entre janeiro de 1981 até dezembro de 2010; nas sub-bacias 1 e 4, entre janeiro de 2000 até dezembro de 2010. Com relação à validação da modelagem, utilizou-se o período de janeiro de 2009 até dezembro de 2012 para todas as sub-bacias.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

As Figuras 5, 6, 7 e 8 ilustram, respectivamente, os resultados obtidos de calibração e validação dos modelos Têmez e HBV nas sub-bacias 1, 2, 3 e 4. Nestas Figuras, (a) representa

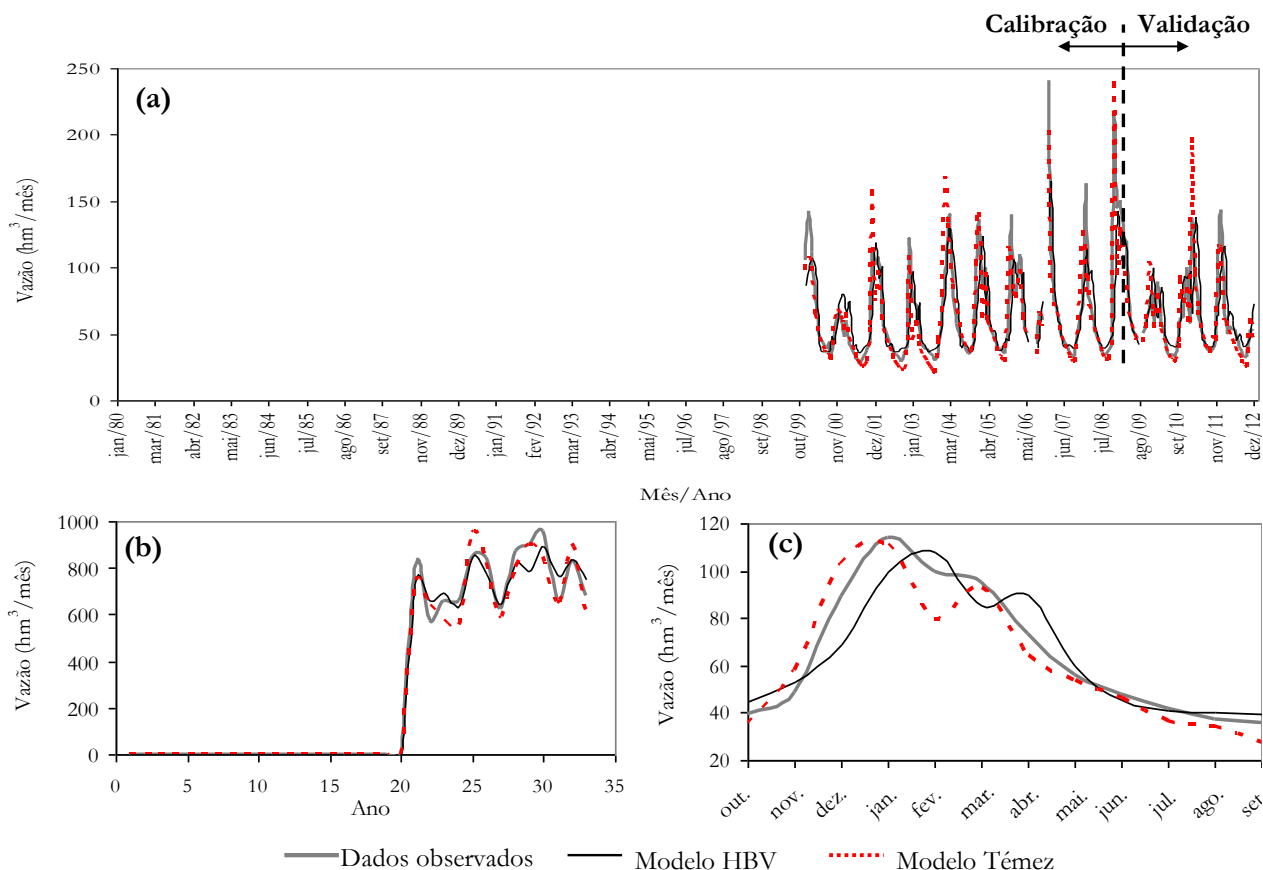


Figura 5 - Resultados da calibração e validação dos modelos Têmez e HBV na sub-bacia 1

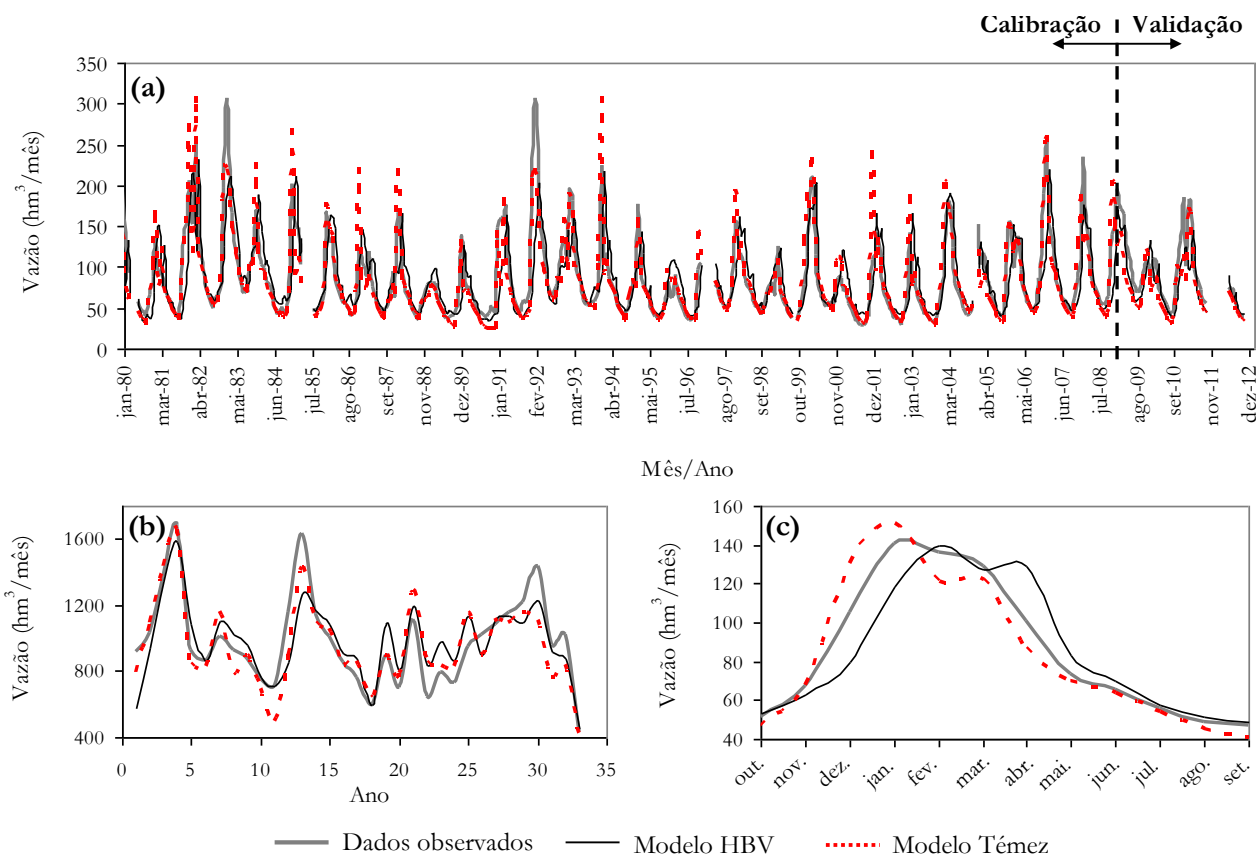


Figura 6 - Resultados da calibração e validação dos modelos Témez e HBV na sub-bacia 2

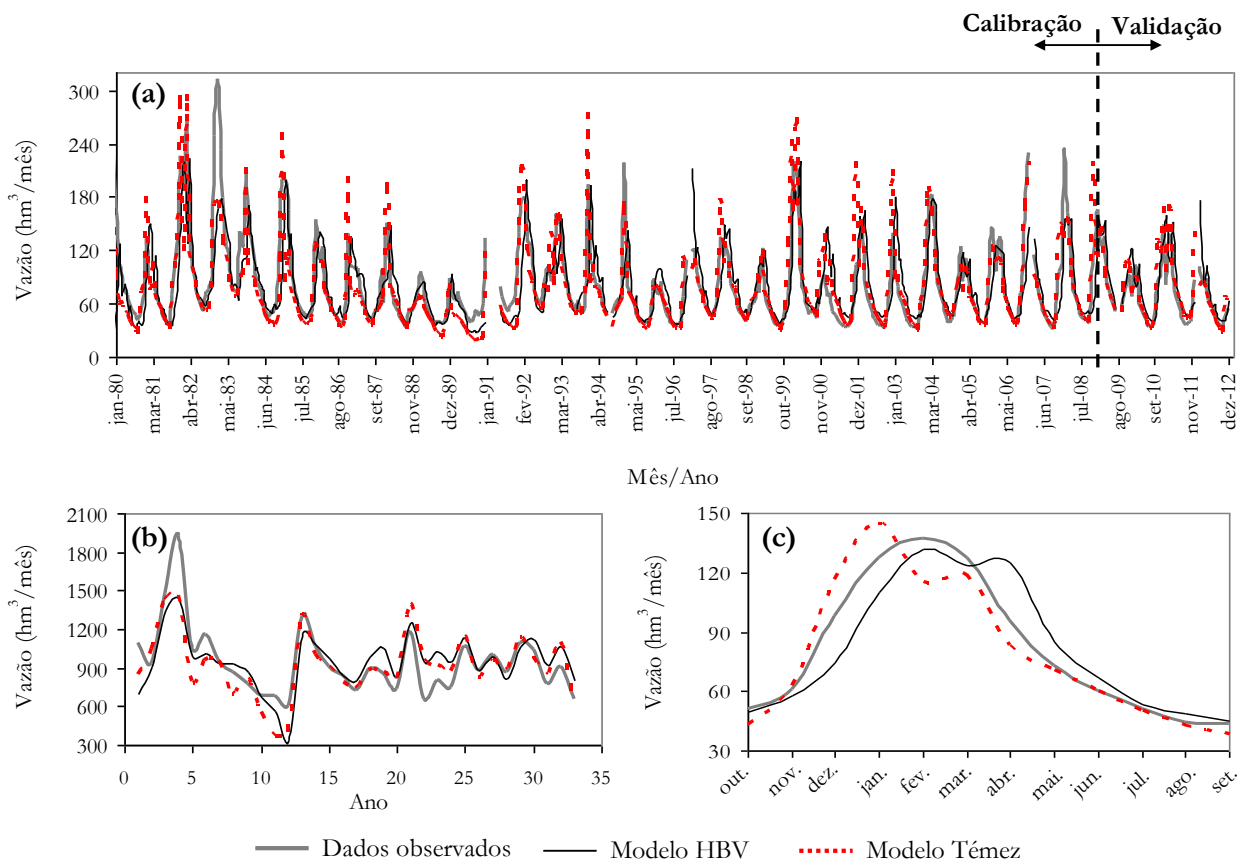


Figura 7 - Resultados da calibração e validação dos modelos Témez e HBV na sub-bacia 3

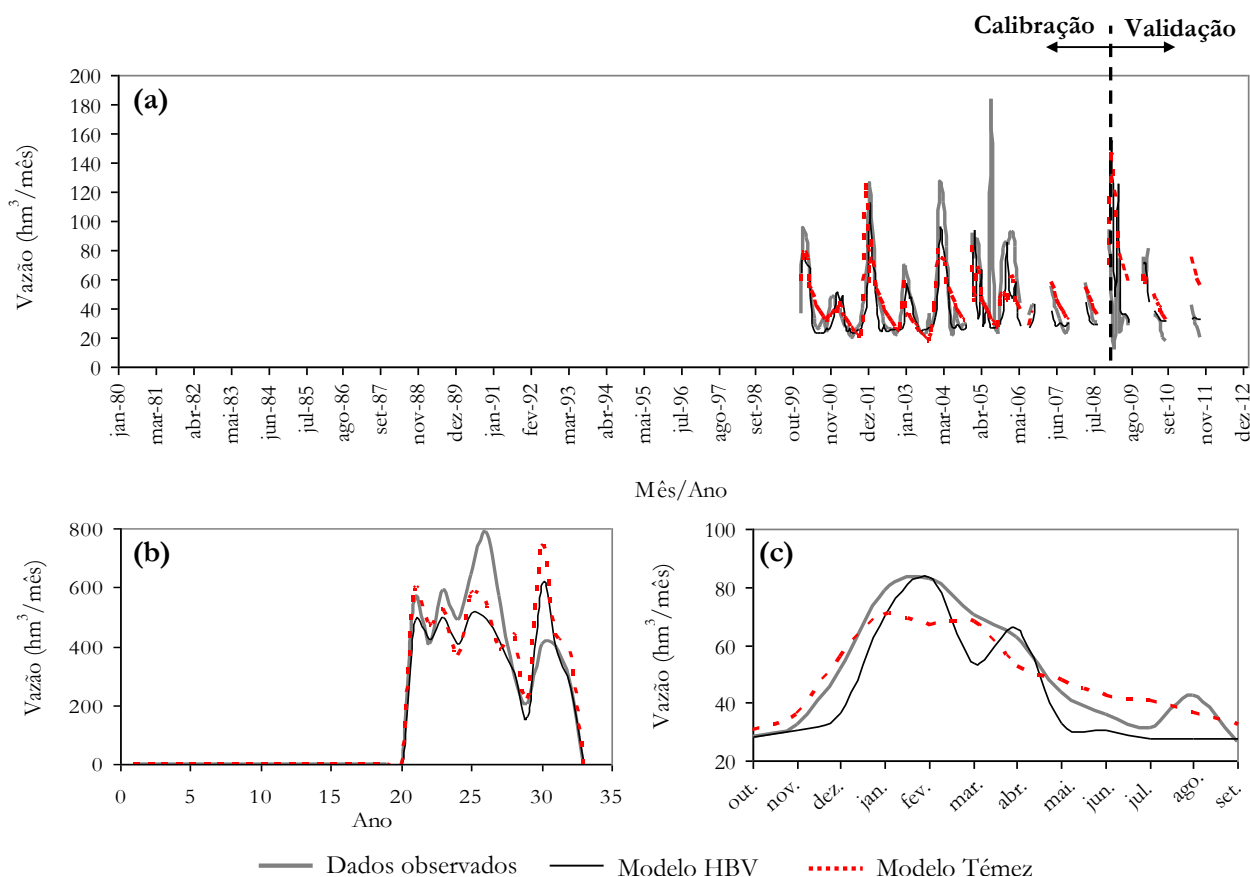


Figura 8 - Resultados da calibração e validação dos modelos Témez e HBV na sub-bacia 4

o ajuste entre os dados observados e simulados de vazão total, (b) representa a variação da vazão anual e (c) representa a variação da vazão média mensal no período de simulação. Houve satisfatório ajuste entre os dados observados e simulados de vazão total, tanto no período de calibração (de janeiro de 1980 até dezembro de 2008 para as sub-bacias 2 e 3; de janeiro de 2000 até dezembro de 2008 para as sub-bacias 1 e 4), quanto na validação (janeiro de 2009 até dezembro de 2012).

De acordo com as Figuras 5(a), 6(a), 7(a) e 8(a), as subestimativas acentuadas nas vazões simuladas, em períodos chuvosos, possivelmente estão relacionadas ao reduzido número de estações pluviométricas operantes na região estudada ou à ocorrência de chuvas concentradas em regiões não cobertas por pluviômetros.

Nas Sub-bacias 1, 2 e 3, de acordo com as Figuras 5c, 6c e 7c, observa-se que os modelos aplicados apresentaram melhores ajustes no período de poucas chuvas, correspondente aos meses de maio até outubro. Este satisfatório ajuste favorece a realização de uma simulação de qualidade da água, para uma situação crítica da capacidade de auto-depuração natural do curso de água e também a análise de conflitos de uso da água superficial.

Os parâmetros calibrados dos modelos Témez e HBV e o valor da função $F_{média}$ utilizada no algoritmo evolutivo de calibração SCE-UA, em cada sub-bacia, estão listados na Tabela 2. Nas sub-bacias 1, 2 e 3, as vazões simuladas pelos modelos tiveram satisfatórios ajustes com as vazões observadas, nas quais

a função $F_{média}$ variou entre 0,69 e 0,86. Os valores da função $F_{média}$ acima de 0,8, obtidos com a aplicação do modelo Témez, demonstram melhor ajuste em comparação ao modelo HBV.

Constatação contrária foi detectada por Mas (2013), na avaliação de vazões na bacia hidrográfica do rio Túria/

Tabela 2 - Parâmetros calibrados e valores da função $F_{média}$ obtidos pelo algoritmo evolutivo de calibração SCE-UA em cada Sub-bacia

Parâmetros	Sub-bacia 1	Sub-bacia 2	Sub-bacia 3	Sub-bacia 4
Modelo Témez				
$H_{m\acute{a}x}$ (mm)	63,190	159,322	188,489	369,356
C (---)	0,100	0,100	0,100	0,100
$I_{m\acute{a}x}$ (mm/mês)	399,993	399,998	399,978	625,060
$Alfa$ (mês ⁻¹)	0,157	0,168	0,173	0,111
$F_{média}$	0,866	0,853	0,818	0,413
Modelo HBV				
$L_{m\acute{a}x}$ (mm)	22,408	0,013	0,114	1,370
K_0 (dia ⁻¹)	0,131	0,124	0,068	0,200
K_1 (dia ⁻¹)	0,252	0,316	0,358	0,030
K_2 (dia ⁻¹)	0,007	0,081	0,080	0,002
K_{per} (dia ⁻¹)	0,556	0,534	0,502	0,835
PWP (mm)	633,575	349,317	310,231	579,326
FC (mm)	649,590	649,757	649,731	508,855
β (---)	1,000	1,000	1,001	2,893
$F_{média}$	0,767	0,714	0,697	0,602

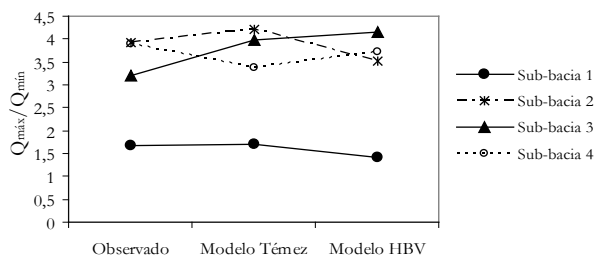
Espanha, onde a função $F_{m\u00e9dia}$ variou entre 0,63 a 0,66 para o modelo Témez e entre 0,78 a 0,80 para o modelo HBV. A extensão temporal dos dados de precipitação e evapotranspiração utilizada por Mas (2013) na calibração dos parâmetros foi de outubro de 1995 até setembro de 2006, extensão esta muito próxima à utilizada neste estudo para as sub-bacias 1 e 4, cujos processos de autocalibração foram similares. Todavia, o número acentuado de estações operantes na Espanha possibilitou, por meio da interpolação de dados vizinhos, melhor estimativa dos resultados nas diversas sub-bacias. Tal constatação mostra que o modelo HBV apresenta maior sensibilidade quanto à qualidade dos dados de precipitação e evapotranspiração.

O agrupamento do médio e baixo cursos da sub-bacia do Alto Rio Quebra-Anzol com a sub-bacia do Ribeirão Grande, agrupamento este denominado sub-bacia 4 resultou em $F_{m\u00e9dia}$ igual a 0,413 para o modelo Témez e 0,602 para o modelo HBV. Neste agrupamento, a vazão considerada na calibração dos parâmetros foi obtida a partir da vazão observada no posto fluviométrico 60280000, subtraída das vazões observadas nos postos fluviométricos de montante. Neste caso, os reduzidos valores de $F_{m\u00e9dia}$ para os modelos podem ser creditados à desconsideração do amortecimento das vazões na calha principal do rio Quebra-Anzol, dentro da Sub-bacia 4.

Isto pode ser explicado pela reduzida quantidade de dados observados no posto fluviométrico sob código 60280000 (ver Figura 8). Além desta carência, os dados dispersos observados no período de janeiro de 2000 até dezembro de 2008 interferiram na qualidade da calibração dos parâmetros. Como consequência, as validações dos modelos na sub-bacia 4 ficaram prejudicadas.

As Figuras 5(b), 6(b), 7(b) e 8(b) ilustram a variação da vazão anual. A relação $Q_{m\u00e1x}/Q_{m\u00edn}$ nas sub-bacias 2, 3 e 4 encontra-se entre 3,19 e 4,16 e, na sub-bacia 1, entre 1,40 e 1,71 (ver Figura 9). Esta discrepância para a sub-bacia 1 está relacionada com a capacidade de armazenamento de água no solo e com o limite máximo de fluxo subsuperficial, respectivamente descritos por $H_{m\u00e1x}$ (para o modelo Témez) e $L_{m\u00e1x}$ (para o modelo HBV). Na sub-bacia 1, observa-se que o valor de $H_{m\u00e1x}$ é inferior e que $L_{m\u00e1x}$ é superior aos valores das outras sub-bacias.

Figura 9 - Relação $Q_{m\u00e1x}/Q_{m\u00edn}$ nas Sub-bacias 1, 2, 3 e 4.



Por meio de uma simples análise nas equações de estado do modelo Témez, para o valor fixo da capacidade máxima de infiltração $I_{m\u00e1x}$ (ver Tabela 2), existe uma relação direta entre a capacidade máxima de armazenamento do solo $H_{m\u00e1x}$, o excedente de precipitação T_t , a infiltração I_t e a saída superficial S_{sup} . Em outras palavras, o baixo valor de $H_{m\u00e1x}$ acarretou na diminuição da saída superficial S_{sup} , o que justificou os menores valores da relação $Q_{m\u00e1x}/Q_{m\u00edn}$ obtidos na sub-bacia 1. Ainda por meio de

uma simples análise nas equações de estado do modelo HBV, observou-se que o elevado valor do limite máximo de fluxo subsuperficial $L_{m\u00e1x}$ na sub-bacia 1 influenciou na diminuição da vazão superficial Q_0 , o que também explica os menores valores da relação $Q_{m\u00e1x}/Q_{m\u00edn}$.

CONCLUSÕES

O artigo apresentou a autocalibração dos parâmetros de dois modelos chuva-vazão, cujos melhores ajustes das vazões observadas e simuladas, no período de poucas chuvas, favorece a simulação de qualidade da água para uma situação crítica da capacidade de autodepuração do curso de água e também a análise de conflitos de uso da água superficial.

A autocalibração bem sucedida dos parâmetros através do algoritmo evolutivo de calibração SCE-UA é encarada como uma importante contribuição deste artigo, visto que esta é uma das atividades mais importantes e difíceis na modelagem chuva-vazão.

Os valores alcançados da função objetivo $F_{m\u00e9dia}$ para os modelos Témez e HBV, em comparação com outro estudo que utilizou a mesma função objetivo no processo de calibração dos parâmetros, mostram que o modelo HBV apresenta maior sensibilidade quanto à qualidade dos dados de entrada de precipitação e evapotranspiração.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem as diversas entidades que disponibilizaram os dados de entrada para as modelagens e as calibrações dos parâmetros, tais como Agência Nacional de Águas, Instituto Nacional de Meteorologia, Companhia Elétrica de Minas Gerais e Superintendência Regional - Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba - do Instituto de Gestão de Águas Mineiras.

Os autores agradecem também a Capes pela concessão de bolsa de estudo, via processo 1304-12-7.

REFERÊNCIAS

- ABEBE, N.A.; OGDEN, F.L.; PRADHAN, N.R. Sensitivity and uncertainty analysis of the conceptual HBV rainfall-runoff model: Implications for parameter estimation. *Journal of Hydrology*, v. 389, n. 3-4, Aug, p. 301-310, 2010.
- BAEZA, B.S. Revisión, análisis y actualización del modelo de Témez en el ámbito de las comarcas de la Marina Alta y la Marina Baja (Alicante). 2011. 282f. (Máster Universitario en Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente) - Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2011.
- BERGSTRÖM, S. The HBV model, computer models of watershed hydrology. *Water Resources Publications*, v. 16, p. 41-51, 1995.

- BEVEN, K. Topmodel: A critique. *Hydrological processes*, v. 11, p. 1069-1085, 1997.
- BURNASH, R.J.C.; FERRAL, R.L.; MCGUIRE, R.A. A generalized streamflow simulation system - conceptual modeling for digital computers. U.S. Department of Commerce, National Weather Service and State of California, Department of Water Resources California, USA, 1973.
- CHEN, J.; WU Y. Advancing representation of hydrologic processes in the Soil and Water Assessment Tool (SWAT) through integration of the TOPographic MODEL (TOPMODEL) features. *Journal of Hydrology*, v. 420-421, Febr., p. 319-328, 2012.
- CRONSHEY, R.; MCCUEN, R.H.; MILLER, N.; RAWLS, W.; ROBBINS, S.; WOODWARD, DON. *Urban Hydrology for Small Watersheds*. 2nd ed. United States Department of Agriculture. Natural Resources Conservation Service, June, 1986.160 p.
- DAKHLAOU, H.; BARGAOU, Z.; BÁRDOSSY, A. Toward a more efficient calibration schema for HBV rainfall-runoff model. *Journal of Hydrology*, v. 444-445, June, p. 161-179, 2012.
- DUAN, Q., SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models. *Water Resource Research*, v. 28, n.4, p. 1015-1031, 1992.
- FELDMAN, A.D. *Hydrologic Modeling System HEC-HMS. Technical Reference Manual*. U.S. Army Corps of Engineers, Hydrologic Engineering Center, 2000. 158 p.
- GAN, T.Y.; BURGESS, S.J. Assessment of soil-based and calibrated parameters of the Sacramento model and parameter transferability. *Journal of Hydrology*, v. 320, n.1, p. 117-131, 2006.
- GARCÍA, L.D.P.; SÁNCHEZ, T.S.Q.; HERNÁNDEZ, J.B. Obtención de Escurrimientos con Efecto del Cambio Climático en la cuenca del río Grande de Morelia. In: CONGRESO NACIONAL DE HIDRÁULICA, XXII., Acapulco, Guerrero, México, noviembre, 2012.
- GETIRANA, A.C.V. Integrating spatial altimetry data into the automatic calibration of hydrological models. *Journal of Hydrology*, v. 387, n. 3-4, June, p. 244-255, 2010.
- GIMÉNEZ, P.O. Modelización Distribuida del Impacto del Cambio Climática en Componentes del Ciclo Hidrológico a Escala Mensual. 2012. 47f. (Máster Universitario en Técnicas Avanzadas en Investigación y Desarrollo Agrario y Alimentario) - Universidad Politécnica de Cartagena, Cartagena, 2012.
- HUBER, W.C.; HEANEY, J.P.; MEDINA, M.A.; PELTZ, W.A.; SHEIKH, H.; SMITH, G.F. *Storm Water Management Model. User's Manual, Version II*, U.S. Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio. 1975.
- HUNDECHA, Y.; BÁRDOSSY, A. Modeling of the effect of land use changes on the runoff generation of a river basin through parameter regionalization of a watershed model. *Journal of Hydrology*, v. 292, n. 1-4, p. 281-295, 2004.
- JIA, Q.Y.; SUN, F.H. Modeling and forecasting process using the HBV model in Liao river delta. *Procedia Environmental Sciences*, v. 13, p. 122-128, 2012.
- LINSLEY, R.K.; CRAWFORD, N.H. Computation of a synthetic streamflow record on a digital computer. *International Association of Scientific Hydrology*, p. 526-538, 1966.
- MAIDMENT, D.R.; TARBOTON, D.G. *The Temez odel, Application with GIS. Semester Report*. The University of Texas, Austin, 2013.
- MAS A.G.C. Evaluación del recurso hídrico en la cuenca del río Turia (España) mediante la aplicación de modelos semiagregados de Precipitación-Escorrentía. Proyecto Final de Carrera. Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 147 p., 2013.
- MURILLO, J.M.; NAVARRO, J.A. Aplicación del modelo de Temez a la determinación de la aportación superficial y subterránea del sistema hidrológico Cornisa-Vega de Granada para su implementación en un modelo de uso conjunto. *Boletín Geológico y Minero*, v. 122, n. 3, p. 363-387, 2011.
- OLIVEIRA, J.R.; PRUSKI, F.F.; NUNES, A.A. Otimização do aproveitamento da disponibilidade de águas superficiais na bacia do Ribeirão entre Ribeiros. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 18, n. 4, p. 157-172, Out/Dez., 2013.
- PAREDES-ARQUIOLA J.; SOLERA, A.; ÁLVAREZ, J.A.; ELVIRA, N.L. *Manual Técnico v1.0 - Herramienta EvalHid para la evaluación de recursos hídricos*. Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, 2011.
- PIZARRO, R.T.; SOTO, M.B.; FARIAS, C.D.; JORDAN, C.D. Aplicación de dos Modelos de Simulación Integral Hidrológica, para la estimación de caudales medios mensuales, en dos cuencas de Chile central. *Bosque*, v. 26, n. 2, p. 123-129, 2005.
- SEIBERT, J. *HBV light version 2, User's Manual*. Uppsala University, Institute of Earth Sciences, Department of Hydrology, Uppsala, Sweden, 2005.
- TÉMEZ, J. R. *Modelo Matemático de transformación "precipitación-escorrentía"*. Madrid: Asociación de Investigación Industrial Eléctrica. ASINEL, 1977. 39 p.
- TUCCI, C.E.M.; ORDONEZ, J.S.; LOPES, M.S. Modelo matemático precipitação-vazão IPH-II. Alguns resultados. *Anais... IV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*. ABRH, Fortaleza. 1981.