

<http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.011616009>

Representação dos processos hidrológicos em bacia hidrográfica do semiárido paraibano com modelagem hidrológica distribuída

Hydrological processes representation in a semiarid catchment located in Paraíba state with distributed hydrological modeling

Vagner de Souza Felix¹ e Adriano Rolim da Paz²

¹Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, Brasil

²Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, PB, Brasil

E-mails: vagnerdfelix@gmail.com (VSF), adrianorpaz@yahoo.com.br (ARP)

Recebido: Janeiro 12, 2016 - Revisado: Janeiro 12, 2016 - Aceito: Abril 06, 2016

RESUMO

O modelo hidrológico distribuído de grandes bacias MGB-IPH vem sendo aplicado em diversas bacias hidrográficas brasileiras com resultados satisfatórios. Entretanto, a aplicabilidade desse modelo a bacias de rios intermitentes, como é típico da região semiárida brasileira, ainda é questionada e foram realizadas apenas limitadas avaliações. Esta pesquisa analisa o desempenho e a aplicabilidade do modelo MGB-IPH em representar os padrões espaço-temporais dos processos hidrológicos na bacia do Rio Piancó (PB), a montante do posto fluviométrico Piancó (área de drenagem de 4603 km²). O MGB-IPH foi executado para um período de 42 anos (1970 a 2011) a nível diário e com células regulares de 5 × 5 km. O modelo conseguiu reproduzir o comportamento geral do hidrograma observado diário e mensal, com métricas equivalentes às obtidas em estudos de bacias de rios perenes realizados com o mesmo modelo. Essas métricas também foram comparáveis ao desempenho de estudo anterior na mesma bacia, porém realizado apenas com passo de tempo mensal e outros modelos hidrológicos. Duas dificuldades principais foram a simulação dos maiores eventos de cheia e da intermitência do rio. Os processos hidrológicos intermediários à transformação chuva-vazão (evapotranspiração, armazenamento de água no solo e geração de escoamento) se mostraram coerentes em termos de sazonalidade, magnitude e distribuição espacial na bacia.

Palavras-chave: MGB-IPH; Modelo hidrológico distribuído; Modelagem chuva-vazão; Rio intermitente; Região semiárida.

ABSTRACT

The large-scale distributed hydrological model MGB-IPH has been applied to several Brazilian watersheds with acceptable results. However, the applicability of this model to watersheds with intermittent rivers, typically occurring in the Brazilian semiarid region, is questioned and limited evaluation has been carried out. This research analyzes the performance and applicability of the MGB-IPH model in representing the spatio-temporal patterns of hydrological processes in the Piancó catchment (PB), upstream from the Piancó streamgauge station (drainage area of 4,603 km²). The MGB-IPH was run for a 42-year period (1970 to 2011) with a daily time step and regular grid cells (5 × 5 km). The model was able to satisfactorily reproduce daily and monthly observed hydrographs, obtaining skill scores equivalent to other model applications for perennial rivers, as well as comparable to the performance of an earlier study developed in this same catchment area (but carried out with a monthly time step and applying different hydrologic models). No systematic error of the model for over- or underestimating the discharges was observed. The hydrological processes intermediate to the rainfall-runoff transformation (evapotranspiration, soil water storage and runoff generation) were coherent in terms of seasonality, magnitude and spatial distribution over the catchment area.

Keywords: MGB-IPH; Distributed hydrologic model; Rainfall-runoff modeling; Intermittent river; Semiarid region.



INTRODUÇÃO

Os modelos hidrológicos distribuídos procuram incorporar a variabilidade espacial dos parâmetros descritivos da geologia, da natureza do solo, da ocupação do solo e do relevo, assim como da distribuição espacial da precipitação e, eventualmente, da evapotranspiração potencial e real (SILANS et al., 2000). Por esse aspecto, permite analisar padrões espaço-temporais das variáveis hidrológicas de uma bacia hidrográfica.

Atualmente existem vários modelos hidrológicos distribuídos que vem sendo utilizados em todo o mundo para simulação de bacias de grande porte, como exemplo os modelos SHE (ANDERSEN; REFSGAARD; JENSEN, 2001), ARNO (TODINI, 1996), VIC-2L (LIANG et al., 1994), LASCAM (VINEY; SIVAPALAN, 2001); TOPKAPI (LIU; TODINI, 2002), LISFLOOD (VAN DER KNIJFF; YOUNIS; ROO, 2010) e MGB-IPH (COLLISCHONN et al., 2007).

O modelo hidrológico distribuído para grandes bacias hidrográficas MGB-IPH (COLLISCHONN et al., 2007) vem sendo aplicado em diversas bacias hidrográficas do Brasil e da América Sul, com resultados bastante satisfatórios, por exemplo: bacia do rio São Francisco (FAN et al., 2015a; SILVA et al., 2007); bacia do rio Uruguai (COLLISCHONN et al., 2005; TUCCI et al., 2003); bacia do rio Paraná e afluentes (NÓBREGA et al., 2011; BRAVO et al., 2009; ADAM et al., 2015); bacia do rio Amazonas e de seus afluentes (FAN et al., 2015b; ZUBIETA et al., 2015; PAIVA; COLLISCHONN; BUARQUE, 2013; PONTES et al., 2015); bacia do Alto Paraguai (BRAVO et al., 2012). Tal modelo também vem sendo utilizado de forma integrada a um Sistema de Informações Geográficas para fins de suporte à decisão de outorga de direito de uso da água (FAN; COLLISCHONN, 2014; PEREIRA; KAYSER; COLLISCHONN, 2012).

Entretanto, o modelo MGB-IPH foi pouco aplicado e avaliado em bacias hidrográficas de rios intermitentes. Silva et al. (2007), Silva (2005), Ribeiro Neto et al. (2007) e Lima Sobrinho (2012) apresentam aplicações nesse tipo de sistema. Nos dois primeiros trabalhos, a aplicação à bacia do Rio São Francisco foi enfatizada para fins de previsão de vazão afluente aos grandes aproveitamentos hidroelétricos, sem maior avaliação do modelo hidrológico na parte semi-árida da bacia. No último trabalho listado, devido à limitação de dados disponíveis, não foi possível observar com tanto rigor o comportamento do modelo sob tais condições.

Já Ribeiro Neto et al. (2007) aplicaram o modelo MGB-IPH em uma sub-bacia do rio São Francisco e compararam os resultados obtidos com um modelo concentrado muito utilizado em bacias de clima semiárido, que é o modelo MODHAC (LANNA, 1997). Ribeiro Neto e colaboradores modificaram o modelo MGB-IPH para que a capacidade do reservatório de interceptação fosse considerado como um parâmetro de solução para conseguir reproduzir satisfatoriamente o regime observado de vazões. Tais autores ressaltaram ainda que mesmo assim foi obtido resultado insatisfatório para o período de validação, mesmo a nível mensal.

A região semiárida é caracterizada por apresentar uma grande variabilidade climática, baixo índice pluviométrico e períodos de secas prolongadas. O solo da região é de pouca profundidade, podendo apresentar afloramento de rochas cristalinas (MOLLE, 1994). Esses fatores podem exercer uma enorme influência para a modelagem hidrológica distribuída. Além disso, o regime de

vazão do semiárido pode variar bastante, podendo alcançar altos picos de vazão (acima de 1.000 m³/s, por exemplo) no período chuvoso e chegar à vazão zero no período de estiagem.

Vale salientar que a população que habita tal região sofre bastante pela escassez hídrica, ou pela gestão ineficiente dos recursos hídricos, aliado aos longos períodos de estiagem, dificultando o desenvolvimento das atividades agropecuárias, entre outras.

Nesse sentido, torna-se necessário aprimorar modelos hidrológicos para simular tamanha variabilidade climática, assim como, demanda × oferta hídrica de uma bacia hidrográfica, previsões de vazões e cenários de mudanças climáticas.

Além disso, compreender como ocorrem os processos hidrológicos da região semiárida pode favorecer a sociedade e dar subsídios aos gestores no processo de gestão dos recursos hídricos.

Dessa forma, o objetivo principal dessa pesquisa é analisar o desempenho do modelo hidrológico distribuído MGB-IPH em representar os padrões espaço-temporais dos processos hidrológicos (evapotranspiração, umidade do solo e geração de escoamento) na bacia do Rio Piancó – PB, a montante da estação fluviométrica Piancó. Esta é uma sub-bacia do Rio Piranhas-Açu, localizada na região semiárida nordestina, e possui grande influência socioambiental e econômica para a região.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

O estudo foi desenvolvido na bacia hidrográfica do Rio Piancó, delimitada até a estação fluviométrica Piancó (Figura 1), localizada na Paraíba, que é uma sub-bacia da bacia hidrográfica do Rio Piranhas-Açu. A bacia do rio Piranhas-Açu nasce no alto sertão paraibano, estendendo-se por esse estado e pelo Rio Grande do Norte, desaguardando no Oceano Atlântico.

A bacia hidrográfica do Rio Piranhas-açu é subdividida em Unidades de Planejamento Hidrológico UPHs, sendo o Rio Piancó uma das UPHs. A UPH do Rio Piancó situa-se no extremo sudoeste do Estado da Paraíba, tendo como fronteiras o Ceará, a oeste, Pernambuco, ao sul, o Alto e Médio Piranhas, ao norte e a bacia do Rio Espinharas, a leste, abrangendo uma área de 9.205 km². O rio Piancó é o rio principal e seus principais afluentes são os rios Jenipapo e Gravatá e os riachos de Santana, Minador, Canoas, Vermelho, Maria e Verde (IBI ENGENHARIA CONSULTIVA S/S, 2013).

A bacia hidrográfica do rio Piancó encontra-se inserida na maior parte na zona climática Awig, segundo a classificação de Köppen, denominada tropical úmido com estação chuvosa concentrada no verão e no outono. Grande parte do seu curso atravessa esta mesma região, enquanto o seu baixo curso e pequena parte dos seus afluentes da margem direita atravessam regiões classificadas como seca de tipo estepe com estação seca no inverno (IBI ENGENHARIA CONSULTIVA S/S, 2013).

A região da bacia em estudo apresenta-se como típica do clima semiárido, possuindo todas as características físicas e hidroclimatológicas representativas do semiárido do Nordeste brasileiro. Além disso, possui grande importância em termos de abastecimento de água para o sertão paraibano (ESCARIÃO et al., 2013), banhando 15 municípios.

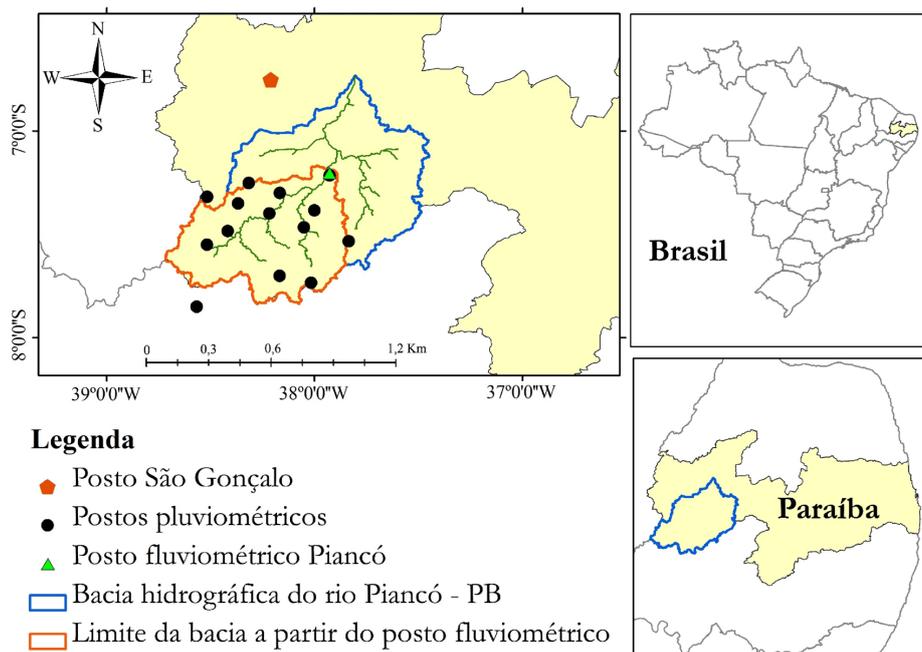


Figura 1. Mapa de localização da área de estudo e das estações pluviométricas, fluviométricas e meteorológicas.

A vegetação predominante é a caatinga e o tipo de uso do solo principal é a atividade agrícola. A bacia hidrográfica apresenta quatro tipos de solo: litossolos, argissolos, cambissolos e luvisolos. O período chuvoso ocorre entre os meses de janeiro a maio, com uma variação de 110 mm a 230 mm mensais. A chuva anual média é em torno de 860 mm.

Neste estudo, a modelagem hidrológica abrange parte da bacia do rio Piancó, aquela situada a montante do posto fluviométrico Piancó. Essa sub-bacia do rio Piancó estudada abrange uma área de 4.603,39 km² (Figura 1). De acordo com UFPB (2011), o posto fluviométrico Piancó não é influenciado por reservatórios a montante da bacia hidrográfica. Nesse trecho, o rio Piancó é intermitente, tendo apresentado vazão nula em 37% do tempo no período de 1970 a 2011, segundo a série de dados diários observados de vazão. Em anos mais secos, essa intermitência é agravada, tendo apresentado cerca de 70% ou mais dos dias sem vazão nos anos de 1980 a 1982, 1993 e 2001.

O modelo MGB-IPH

O MGB-IPH é um modelo hidrológico distribuído para grandes bacias descrito em Collischonn (2001) e Collischonn et al. (2007). O modelo é composto dos seguintes módulos principais: evapotranspiração; balanço de água no solo; geração de escoamentos superficial, subsuperficial e subterrâneo na célula; e propagação de escoamento na rede de drenagem.

Neste trabalho foi utilizada a versão do referido modelo que adota uma discretização da bacia na forma de uma grade regular, interconectadas entre si por uma rede de drenagem (PAZ; COLLISCHONN; SILVEIRA, 2006; PAZ; COLLISCHONN, 2007). Cada célula da grade é dividida em unidades de resposta hidrológica (URH), sem considerar a localização dentro da célula,

mas que permite levar em conta a variabilidade das características físicas da bacia no interior de cada célula. A definição das URHs é função da combinação das características de uso do solo, cobertura vegetal e tipo de solo.

Em uma célula do modelo, os processos de interceptação, evapotranspiração e geração de escoamento e o balanço de água no solo são simulados em cada URH de forma independente. Os escoamentos resultantes de todas as URHs em uma célula são somados e armazenados em reservatórios distintos conforme sua natureza superficial, sub-superficial e subterrânea. Um reservatório linear simples é utilizado para simular o aporte de cada um desses tipos de escoamento gerado na célula até a rede de drenagem. O escoamento ao longo da rede de drenagem é propagado até a célula de jusante ao longo do trecho de rio que conecta as duas células (PAZ; COLLISCHONN, 2007), segundo o método Muskingum-Cunge na abordagem de Tucci (1998) – na versão do modelo MGB-IPH utilizada neste estudo.

A evaporação do reservatório de interceptação e a evapotranspiração das diferentes coberturas vegetais são calculadas separadamente, utilizando a formulação de Penman-Monteith conforme descrito em Collischonn (2001).

Dados de entrada e definição dos parâmetros do modelo

Os dados de precipitação pluviométrica para a área de estudo foram obtidos no portal eletrônico HidroWEB da ANA (Agência Nacional das Águas), complementados por dados cedidos pela AESA (Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba). Foram utilizadas 14 estações pluviométricas (Figura 1).

Para calibração e validação do modelo, foi utilizada a série de vazões do posto fluviométrico Piancó (Código ANA 37340000), que

é monitorado desde 1963. Os dados meteorológicos foram obtidos junto ao Instituto Nacional de Meteorologia para a estação São Gonçalo, localizada próximo da área em estudo (cerca de 60 km).

Para a definição das URHs, foram analisados os mapeamentos de cobertura vegetal e tipo de solo disponibilizados pelo portal eletrônico do Ministério do Meio Ambiente. Foram definidas sete unidades de respostas hidrológicas, cuja ocorrência na bacia é resumida na Tabela 1 e apresentada na Figura 2.

No modelo MGB-IPH, existem os parâmetros considerados fixos e os calibráveis. A diferença básica é que para o primeiro tipo (que corresponde aos parâmetros albedo, índice de área foliar (IAF), resistência superficial e altura da cobertura vegetal) são definidos valores com base apenas na literatura, enquanto para o segundo tipo a literatura serve de indicação de valores de referência, mas valores específicos são ajustados em cada aplicação do modelo conforme o procedimento de calibração. Neste estudo, a definição dos valores dos parâmetros fixos foi realizada a partir de aplicações anteriores do referido modelo: Silva (2005); Collischonn (2001) e Ribeiro Neto (2006). Esses mesmos estudos serviram de base para definir os valores iniciais dos parâmetros calibráveis, que são: W_m (armazenamento de água no solo); b (parâmetro da relação de armazenamento e saturação de água no solo); K_{int} (parâmetro de drenagem subsuperficial); K_{bas} (parâmetro de escoamento subterrâneo); WC (limite de armazenamento para haver fluxo ascendente ou descendente); C_b (parâmetro de retardo do reservatório subterrâneo); C_s (parâmetro para calibração da propagação superficial nas células) e C_i (parâmetro para calibração da propagação subsuperficial nas células).

Tabela 1. Unidades de resposta hidrológica (URH).

URH	Área (km ²)	Área (%)
Argissolos/caatinga	910,12	19,8
Litosossolos/caatinga	2352,22	51,1
Cambissolos/caatinga	229,42	5,0
Argissolos/atividade agrícola	392,95	8,5
Luvissolos/atividade agrícola	135,50	2,9
Litossolo/atividade agrícola	583,18	12,7
Água	17,73	0,4
Total	4604,39	100,0

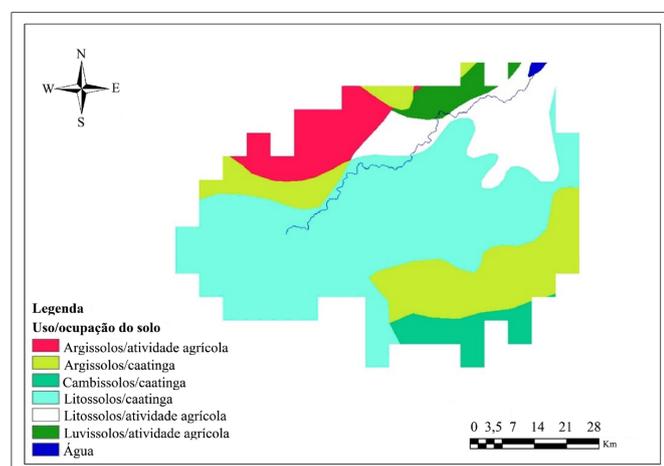


Figura 2. Ocorrências das unidades de resposta hidrológica na bacia.

Calibração e ajuste do modelo

O modelo MGB-IPH foi executado com passo de tempo diário para um período de 42 anos (1970-2011), escolhido em função da disponibilidade de dados pluviométricos e fluviométricos. Foram definidos dois períodos de 21 anos, um para calibração (1970 a 1990) e outro para validação (1991 a 2011) do modelo. Esses dois períodos apresentam semelhança entre si em termos de ocorrência de vazões extremas máximas e períodos de estiagem.

A calibração foi realizada em duas etapas. Inicialmente os parâmetros foram calibrados de forma automática, segundo a versão padrão do algoritmo de otimização multiobjetivo implementado no modelo MGB-IPH (COLLISCHONN et al., 2007). Em seguida, os valores ótimos dos parâmetros foram refinados manualmente.

A calibração consistiu em encontrar valores ótimos dos parâmetros calibráveis segundo as três funções objetivo tradicionalmente utilizadas no referido modelo: Coeficiente de Nash-Sutcliffe (NS) das vazões diárias, Coeficiente de Nash-Sutcliffe dos logaritmos das vazões diárias (NSlog) e o erro relativo de volume baseado na integração das vazões diárias (EV) (Equação 1, 2 e 3, respectivamente).

$$NS = 1 - \frac{\sum (Q_{obs}(t) - Q_{calc}(t))^2}{\sum (Q_{obs}(t) - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (1)$$

$$NS \log = 1 - \frac{\sum (\ln(Q_{obs}(t)) - \ln(Q_{calc}(t)))^2}{\sum (\ln(Q_{obs}(t)) - \ln(\bar{Q}_{obs}))^2} \quad (2)$$

$$EV = \frac{\sum (Q_{calc}(t) - Q_{obs}(t))}{\sum (Q_{obs}(t))} \quad (3)$$

onde: $Q_{obs}(t)$ e $Q_{calc}(t)$ são as vazões observadas e calculadas no instante de tempo t , e \bar{Q}_{obs} é a vazão média observada.

Após o ajuste do modelo, a quantificação da concordância entre vazões observadas e calculadas foi estendida para além do uso das três funções-objetivo mencionadas anteriormente. Foram calculados também: o coeficiente de correlação (r ; Equação 4); o erro médio absoluto (EMA; Equação 5); a raiz do erro médio quadrático (REMQ; Equação 6); o coeficiente de eficiência de referência (BE – normalized benchmark efficiency), proposto por Schaefli e Gupta (2007) (Equação 7), e já utilizado por Getirana, Rotunno Filho e Mansur (2011) com o modelo MGB-IPH; e o coeficiente de eficiência volumétrica (VE) apresentado por Criss e Winston (2008) (Equação 8).

$$r = \frac{\sum [(Q_{obs}(t) - \bar{Q}_{obs}) \cdot (Q_{calc}(t) - \bar{Q}_{calc})]}{\sqrt{\sum (Q_{obs}(t) - \bar{Q}_{obs})^2} \cdot \sqrt{\sum (Q_{calc}(t) - \bar{Q}_{calc})^2}} \quad (4)$$

$$EMA = \frac{1}{n} \sum |Q_{calc}(t) - Q_{obs}(t)| \quad (5)$$

$$REMQ = \sqrt{\frac{\sum (Q_{obs}(t) - Q_{calc}(t))^2}{n}} \quad (6)$$

$$BE = 1 - \frac{\sum(Q_{obs}(t) - Q_{calc}(t))^2}{\sum(Q_{obs}(t) - Q_{ref_j})^2} \tag{7}$$

$$VE = 1 - \frac{\sum|Q_{calc}(t) - Q_{obs}(t)|}{\sum(Q_{obs}(t))} \tag{8}$$

onde: Q_{ref} é a vazão de referência do dia j do calendário; $\overline{Q_{calc}}$ é a vazão média calculada; n é o número de passos de tempo de cálculo.

As medidas de desempenho r , EMA e REMQ são amplamente utilizadas para avaliar ajustes de modelos hidrológicos. Nesse sentido, a utilização de tais métricas tem o objetivo de ampliar as comparações de desempenho alcançado pelo o modelo MGB-IPH em relação aos resultados de outros modelos hidrológicos aplicados em bacias de clima semiárido.

Os coeficientes BE e VE foram adotados visando possibilitar inferências mais adequadas sobre o grau de concordância entre vazões observadas e calculadas. Para rios com forte componente sazonal, a comparação do desempenho do modelo com a estimativa constante da média anual enfraquece a relevância do valor de NS (GETIRANA; ROTUNNO FILHO; MANSUR, 2011). Por isso, o coeficiente BE foi adotado, considerando como vazão de referência a média histórica de cada dia do ano, ou seja, essa métrica avalia o quanto o modelo hidrológico foi superior a considerar como predição o valor médio histórico em cada dia do calendário.

O coeficiente VE varia de 0 a 1 e procura avaliar o desvio entre hidrogramas observado e calculado pela medição da área entre eles, expresso em termos de fração de volume de água escoado (CRISS; WINSTON, 2008). Todas as métricas descritas foram calculadas também a nível mensal, para avaliar a performance do modelo com esse passo de tempo, que é o mais comumente adotado em estudos hidrológicos no semiárido.

Análise dos processos hidrológicos

Foram analisados os resultados simulados pelo modelo hidrológico quanto aos seguintes processos hidrológicos: evapotranspiração, umidade do solo e geração de escoamento superficial, sub-superficial e subterrâneo. Tais processos foram avaliados quanto à sazonalidade e à distribuição espacial na bacia hidrográfica e relacionados ao uso do solo e tipo de solo segundo cada URH. Foram geradas e analisadas séries temporais dos processos hidrológicos em termos de valor médio para toda a bacia hidrográfica, valores médios por URH e valores médios por célula da discretização do modelo hidrológico. Esses resultados também foram confrontados com estimativas ou medições realizadas por outros estudos na região semiárida nordestina.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Parâmetros ótimos

Percebe-se que a parametrização do modelo representa satisfatoriamente os aspectos físicos do solo e vegetação (Tabela 2). O W_m , no ajuste manual, variou de 430 mm, para URH com Litossolos e vegetação do tipo caatinga, a 730 mm para Argissolos

com atividade agrícola. Silva (2005) também encontrou valores elevados de W_m variando de 571 mm para vegetação do tipo caatinga a 7885 mm para pastagem com solo profundo. Saldanha et al. (2012), na bacia hidrográfica do rio Uruguai, ajustaram o modelo com valores de W_m baixos, variando de 100 mm para o tipo de solo Neossolo Litólico a 350 mm para o Nitossolo Vermelho.

O parâmetro b controla a separação de escoamento superficial até a saturação da capacidade de armazenamento do solo (COLLISCHONN, 2001), ou seja, tem maior efeito para as cheias de pequeno e médio porte, quando o solo não está saturado. O valor igual a 0,11 obtido na calibração deste estudo representa valor baixo dentre a faixa comum para tal parâmetro (COLLISCHONN, 2001), e está coerente com a dificuldade de geração de escoamento superficial no semiárido para eventos de precipitação de pequeno porte.

O K_{int} e o K_{bas} são, respectivamente, os parâmetros que controlam os escoamentos sub-superficial e de base no modelo MGB-IPH. No ajuste obtido nesta pesquisa, os valores de 2 mm/dia para K_{int} e de 0,001 mm/dia para K_{bas} são considerados baixos, no limite inferior da faixa de variação apresentada na literatura. Isso mostra que o ajuste dos hidrogramas no posto Piancó foi melhor alcançado considerando muito pouca geração de escoamento subsuperficial e praticamente desprezando a geração de escoamento de base – o que está coerente com a formação de escoamento nas condições semiáridas da bacia.

Ajuste do modelo a nível diário

De modo geral, o modelo MGB-IPH conseguiu reproduzir satisfatoriamente o comportamento geral do hidrograma observado, em termos da sazonalidade das vazões, da distinção de anos mais secos e anos mais úmidos, do instante de tempo de subida e descida dos hidrogramas e da intensidade das cheias de pequeno e médio porte. Esse comportamento foi semelhante tanto no período de calibração (Figura 3) quanto no período de validação (Figura 4). Destaca-se, por exemplo, a capacidade do modelo na representação dos três anos hidrológicos mostrados nessas figuras para o período de calibração (1984 a 1986) e para o período de validação (2002 a 2005).

Percebe-se, entretanto, dificuldade do modelo na representação das maiores cheias, com subestimação na maioria dos anos (exemplo: cheias de 1980, 1985, 1995 e 2000), mas também superestimação em alguns anos (1971, 1974 e 1977). A análise de dispersão entre

Tabela 2. Parâmetros ótimos ajustados.

URH	W_m (mm)	b (-)	K_{bas} (mm/dia)	K_{int} (mm/dia)
1	730	0,11	0,001	2,0
2	430	0,11	0,001	2,0
3	630	0,11	0,001	2,0
4	730	0,11	0,001	2,0
5	530	0,11	0,001	2,0
6	430	0,11	0,001	2,0
7	0	0,11	0,001	2,0

URHs: 1 = Argissolos/caatinga; 2 = Litossolos/caatinga; 3 = Cambissolos/caatinga; 4 = Argissolos/atividade agrícola; 5 = Luvisolos/atividade agrícola; 6 = Litossolo/atividade agrícola; 7 = Água.

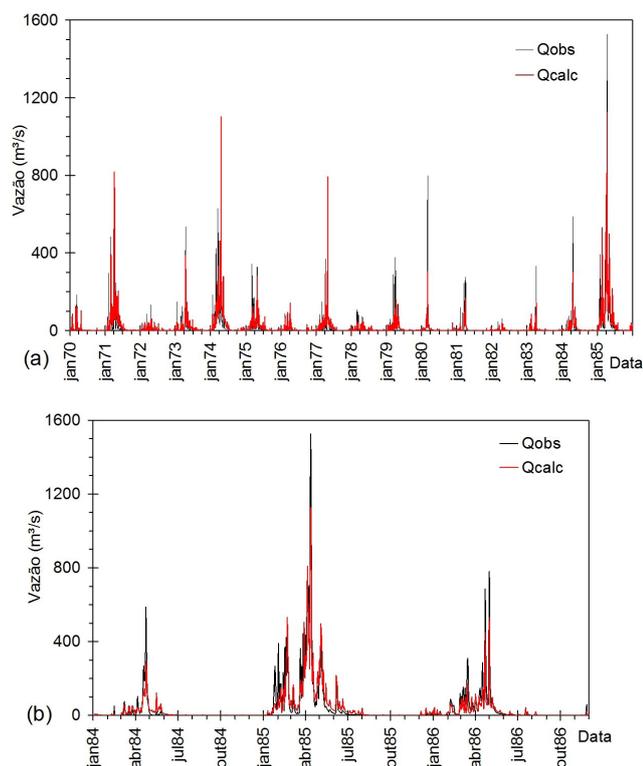


Figura 3. Comparação entre hidrogramas diários observados e calculados em parte do período de calibração.

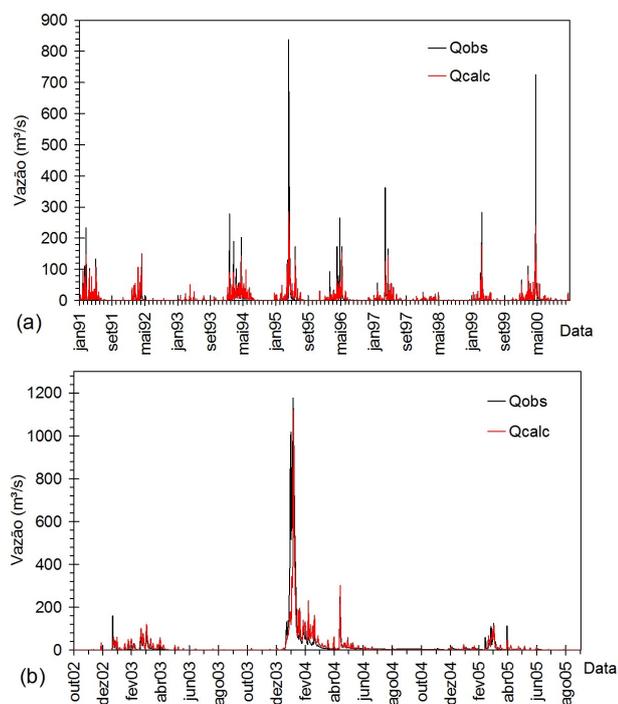


Figura 4. Comparação entre hidrogramas diários observados e calculados em parte do período de validação.

vazões calculadas e observadas não deixa clara a existência de erro sistemático ou tendência do modelo em superestimar ou subestimar as vazões observadas, seja em qualquer patamar de vazões, tanto no período de calibração quanto de validação (Figura 5).

A comparação entre as curvas de permanência, por outro lado, ressalta a incapacidade do modelo em simular a intermitência do rio Piancó (Figura 6). Nos períodos de estiagem em que o rio seca completamente, o modelo MGB-IPH simulou vazões muito pequenas (abaixo de $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$). A partir da permanência 5% até 60%, o modelo apresentou maiores valores do que os observados, mas seguindo uma curva de permanência paralela à observada. Para as maiores vazões de cheias, com permanência inferior a 5%, houve maior correspondência entre as curvas de permanência dos valores observados e calculados pelo modelo.

A despeito das dificuldades detectadas ao comparar visualmente os hidrogramas observados e calculados, as estatísticas de ajuste do modelo (Tabela 3) são no mesmo patamar das obtidas na maioria das demais aplicações do modelo para bacias de rios perenes. Por exemplo, o valor de NS e EV obtidos foram na mesma faixa ou até superior aos obtidos por Allasia et al. (2006), Getirana, Rotunno Filho e Mansur (2011), Meller, Bravo e Collischonn (2012) e Meller et al. (2014).

Enquanto as aplicações do modelo em rios perenes resultaram em NSlog equiparável ao NS, o NSlog obtido nesta pesquisa foi negativo. Pela natureza da função logarítmica, ela é propositalmente utilizada para avaliar desempenho de modelos hidrológicos ponderando fortemente as menores vazões. Entretanto, no caso de rios intermitentes como o rio Piancó, tem-se que o NSlog tende a resultar em valores negativos, mesmo com pequenos desvios entre vazões calculadas e observadas, o que demonstraria pouca utilidade de tal função objetivo para esse caso.

O valor do coeficiente BE entre 0,62 e 0,66 foi próximo aos maiores valores obtidos por Getirana, Rotunno Filho e Mansur (2011) em estudo na bacia do rio Negro, na Amazônia. Esse resultado mostra a qualidade no ajuste do modelo em reproduzir o regime observado do rio Piancó. Tal coeficiente avalia o quanto melhor o modelo foi em relação a um modelo simplificado de considerar a média histórica de cada dia do ano. Embora esse modelo alternativo seja também bastante simplificado, ele retrata fortemente a sazonalidade marcante da bacia e o patamar médio de vazões nos períodos de estiagem e cheia. Assim, tomar esse modelo alternativo considerado no coeficiente BE é uma estimativa para comparação muito superior à adoção da média de longo termo, como considerado no NS.

Ajuste do modelo a nível mensal

Os resultados do ajuste do modelo a nível mensal (Tabela 4 e Figura 7) são superiores aos obtidos nas estatísticas a nível diário, como é esperado, pois quanto maior o passo de tempo considerado, menores são as flutuações e a variabilidade, sendo mais fácil o acerto pelo modelo. Além disso, incertezas ou mesmo erros na chuva diária observada são minimizados ao trabalhar com passo de tempo mensal, pelo efeito de compensação.

Escarião et al. (2013) encontraram valores de r para quatro modelos hidrológicos aplicados à bacia do rio Piancó bem próximos ao obtido pelo MGB-IPH na presente pesquisa. O melhor valor

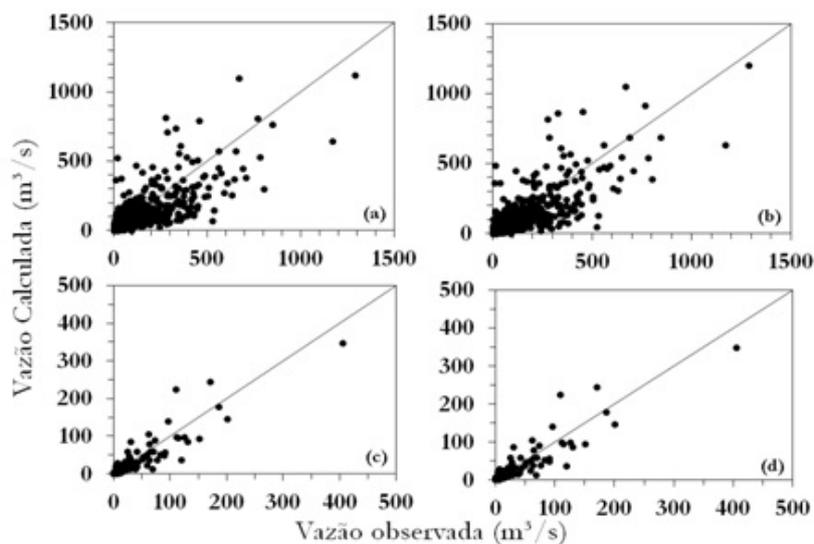


Figura 5. (a),(b) Vazões diárias calculadas x observadas para o período de calibração e de validação; (c),(d) idem para as vazões mensais.

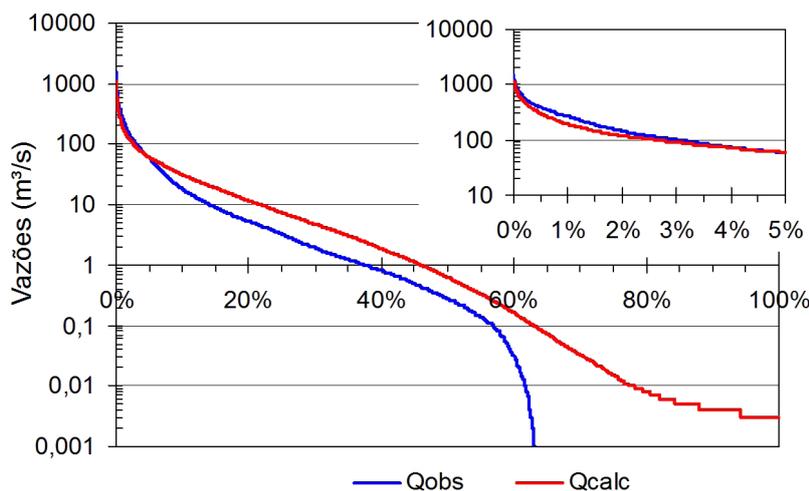


Figura 6. Curva de permanência das vazões diárias observadas e calculadas para o período de 1970 a 2011, com detalhe para as vazões de superadas em até 5% do tempo.

Tabela 3. Valores das estatísticas a nível diário.

Estatísticas	Calibração	Validação
NS	0,70	0,62
NSlog	-0,11	0,05
EV%	3,42	11,81
R	0,84	0,79
EMA (m³/s)	10,64	7,36
REMQ (m³/s)	35,15	30,68
VE	0,35	0,21
BE	0,64	0,58

Tabela 4. Valores das estatísticas a nível mensal.

Estatísticas	Calibração	Validação
NS	0,82	0,81
NSlog	0,04	0,12
EV%	0,06	12,87
R	0,91	0,90
EMA (m³/s)	7,85	5,41
REMQ (m³/s)	17,89	13,70
VE	0,53	0,46
BE	0,72	0,78

de r encontrado pelos autores mencionados foi de 0,86 para o modelo conceitual concentrado GHR. Outro modelo utilizado pelos referidos autores foi o MIKE SHE, que é um modelo hidrológico distribuído, que apresentou coeficiente de correlação de 0,55, bem inferior ao obtido nesta pesquisa. Enquanto valores de EMA obtidos pelo MGB-IPH para o rio Piancó foram semelhantes

aos alcançados por Escarião et al. (2013) na mesma bacia, o erro de volume obtido por tais autores (1,8% para o modelo MIKE SHE e 0,19% para o modelo GHR) foi inferior ao desta pesquisa.

Ribeiro Neto et al. (2007) aplicaram o MGB-IPH a uma sub-bacia localizada na porção semiárida do rio São Francisco e obtiveram valores de NS entre 0,55 e 0,83, equivalentes aos obtidos

nesta pesquisa. Ressalta-se, porém, que tais autores modificaram o modelo MGB-IPH para que a capacidade do reservatório de interceptação fosse considerado como um parâmetro.

Na comparação visual entre hidrogramas observados e calculados a nível mensal (Figura 6), percebem-se erros do modelo principalmente nas vazões de pico, com maior ocorrência de subestimativas. A análise de dispersão entre vazões mensais observadas e calculadas (Figura 5), entretanto, não transparece a existência de erros sistemáticos, seja nas vazões extremas superiores ou em outros patamares.

Evapotranspiração

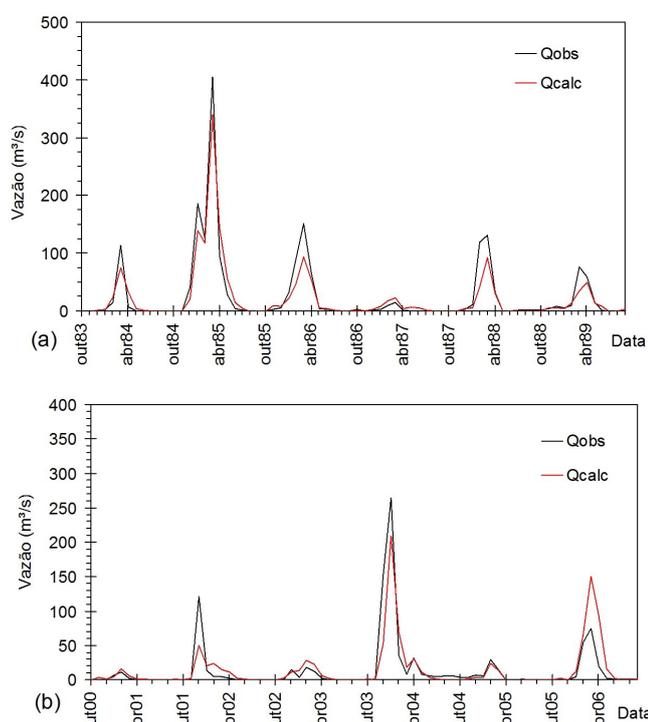


Figura 7. Comparação entre hidrogramas mensais observados e calculados em parte dos períodos de (a) calibração e (b) validação.

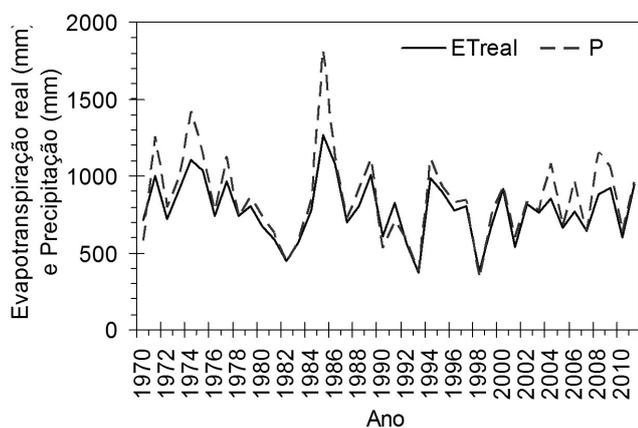


Figura 8. Evapotranspiração real anual simulada e precipitação na bacia do rio Piancó.

A evapotranspiração real (ET_r) anual simulada pelo modelo MGB-IPH para o período completo de estudo (1970 a 2011) é apresentada na Figura 8, em termos de valores médios sobre a bacia. Ao longo desse período, a ET_r anual varia de 369 a 1280 mm, enquanto a precipitação anual média sobre a bacia varia de 336 a 1819 mm. Observa-se a variabilidade interanual da ET_r fortemente relacionada à variabilidade da precipitação. Isso é esperado, já que o elevado potencial evapotranspirativo típico da região semiárida é mais ou menos atendido conforme maior ou menor ocorrência de chuvas ao longo do ano.

Em termos de valores médios mensais (Figura 9), tem-se que a ET_r é marcadamente sazonal, com menores taxas entre setembro e novembro (mínimo de 16 mm em outubro) e as maiores taxas ocorrendo de fevereiro a junho, com média mensal acima de 80 mm e pico de quase 120 mm em março. Assim como a variabilidade interanual, a variabilidade intra-anual é condicionada pela ocorrência de precipitação, cujas maiores taxas ocorrem nos primeiros meses do ano e as menores entre julho e novembro. Entretanto, percebe-se uma defasagem entre a variabilidade dos valores médios mensais de precipitação e de ET_r, o que tem relação com o armazenamento de água na bacia.

Na Tabela 5 apresenta-se o valor médio anual da evapotranspiração real para as diferentes URHs adotadas neste estudo, a qual varia de 772 a 883 mm/ano. Geralmente, há uma tendência para que a vegetação de maior porte associada a solos com maior profundidade conduza às maiores taxas de evapotranspiração (RIBEIRO NETO, 2006). Os resultados obtidos, de modo geral, corresponderam a essa expectativa, com uma relação aproximadamente linear ($r = 0,75$) entre a ET_r média

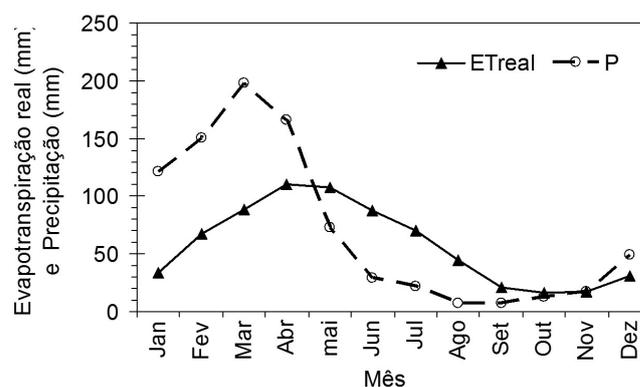


Figura 9. Médias mensais de precipitação e evapotranspiração real simulada na bacia do rio Piancó.

Tabela 5. Média anual de evapotranspiração real simulada para cada URH.

URH	ET _r (mm.ano ⁻¹)
Argissolos/caatinga	792
Litossolos/caatinga	777
Cambissolos/caatinga	772
Argissolos/atividade agrícola	838
Luvisolos/atividade agrícola	787
Litossolo/atividade agrícola	746
Água	883

anual e a capacidade máxima de armazenamento de água no solo, representada no modelo pelo parâmetro W_m (Tabela 1).

Em termos de evapotranspiração real a nível diário, obteve-se neste estudo uma média de 2 mm para a bacia do rio Piancó. Tal resultado está coerente com os trabalhos de Folhes, Rennó e Soares (2009), Bezerra (2013) e Silva et al. (2012). Folhes, Rennó e Soares (2009) estimaram para a região semiárida cearense, via sensoriamento remoto e pesquisa de campo, a ETr média diária igual a 3,7 mm para o período de 24 de outubro de 2005 a 08 de agosto de 2006. Bezerra (2013) verificou, para a região semiárida do Rio Grande do Norte, no período de janeiro de 2005 a dezembro de 2010, utilizando SIG e dados meteorológicos, que área de solos expostos apresentaram taxas de evapotranspiração menores que 1 mm/dia, enquanto que a vegetação nativa (caatinga muito rala e sem folhas) apresentou taxa que variou de 1 a 3 mm/dia e a caatinga mais densa obteve variação de 3 a 5 mm/dia. Os valores acima de 5 mm/dia representam área de superfície líquida (reservatório).

Com auxílio de sensoriamento remoto, Silva et al. (2012) estimaram a ETr diária para o perímetro irrigado de São Gonçalo (PB) para algumas datas entre 29 de agosto e 19 de dezembro de

2008, respectivamente. Nas áreas de coqueiro irrigadas prevaleceram valores maiores que 3 mm e para as áreas de sequeiro e ocupadas com habitações humanas obteve-se taxas entre 0 e 2 mm.

A Figura 10 mostra a distribuição da ETr média mensal espacialmente sobre a bacia do rio Piancó. A sazonalidade da ETr em resposta à sazonalidade da precipitação é novamente visível, com maiores taxas de fevereiro a junho. Percebe-se que a região central da bacia, tomada principalmente por litossolos e caatinga, nos meses de janeiro a junho apresenta as maiores taxas de ETr, enquanto que a partir de julho as maiores taxas de ETr são obtidas para as porções noroeste e sudeste da bacia. A região central da bacia é ocupada pela URH litossolos/caatinga, com solos de menor espessura e menor capacidade de armazenamento de água no solo, enquanto as porções noroeste e sudeste predominam as URHs com argissolos, considerados os de maior profundidade neste estudo. Portanto, tem-se que nos primeiros meses do ano, a variabilidade espacial da ETr simulada não reflete diretamente a profundidade do solo e cobertura vegetal, mas sim a distribuição espacial da precipitação (Figura 11), que é justamente de maior intensidade nesse período do ano. Já no período de estiagem o principal fator que explica a variabilidade espacial da ETr simulada na bacia é a ocorrência das URHs, notadamente em função do parâmetro W_m . Isso é mais marcante no início do período de estiagem, como julho, por exemplo, quando os solos mais profundos estão com maior volume de água armazenado do período chuvoso e servem como fonte de água para atender à demanda evaporativa – logo, nesse período, quanto maior o W_m na URH maior foi a ETr.

Fisicamente, o padrão de variação espacial de ETr também tem relação com a variabilidade das condições meteorológicas (velocidade do vento, radiação solar, temperatura do ar, umidade do ar e pressão atmosférica). Entretanto, como neste estudo foram adotados dados meteorológicos de uma única estação para toda a bacia hidrográfica, tais variáveis são constantes espacialmente neste estudo e, logo, não influenciam o padrão espacial de ETr obtido.

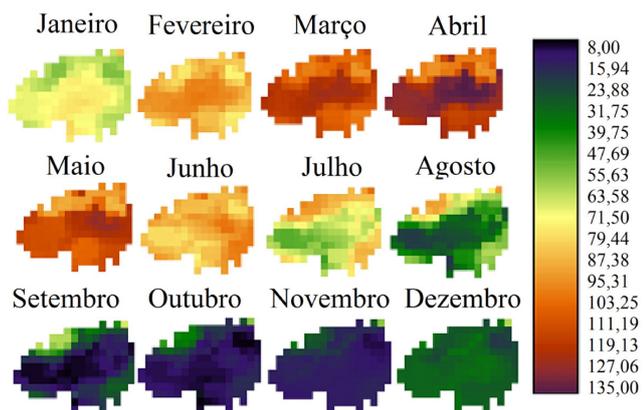


Figura 10. Distribuição espacial da ETr média mensal (mm) simulada para a bacia do rio Piancó.

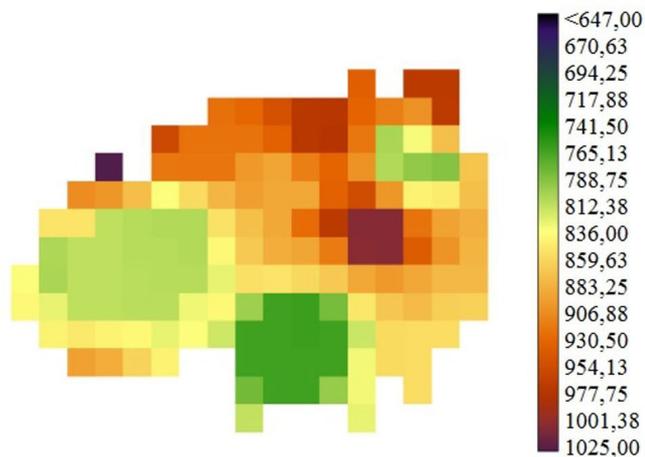


Figura 11. Distribuição espacial da precipitação anual (mm) na bacia do rio Piancó para o período 1970 a 2011.

Umidade do solo

A umidade do solo média anual simulada pelo modelo MGB-IPH para o período inteiro estudado, de 1970 a 2011, varia de 116 a 223 mm, conforme a URH correspondente (Tabela 6). O comportamento da umidade do solo média varia conforme a capacidade máxima de armazenamento de água no solo da URH definida no modelo pelo parâmetro W_m (Tabela 1). Tem-se uma relação aproximadamente linear entre essas grandezas, com coeficiente de correlação de 0,71. Isso está de acordo com o conhecimento

Tabela 6. Umidade do solo média anual por URH.

Uso/tipo de solo e vegetação	Umidade (mm/ano)	Umidade (% de W_m)
Argissolos/caatinga	171	23
Litossolos/caatinga	116	27
Cambissolos/caatinga	156	25
Argissolos/atividade agrícola	223	31
Luvissolos/atividade agrícola	163	31
Litossolo/atividade agrícola	134	31
Água	0	-

teórico de que solos de maiores profundidades e com vegetação densa tendem a apresentar maiores índices de umidade.

A URH argissolos/caatinga resulta em umidade do solo média anual cerca de 47% maior do que a URH litossolos/caatinga e 9,6% maior que a URH cambissolos/caatinga. A URH cambissolos/caatinga obteve 34% a mais de umidade do solo anual que a URH litossolos/caatinga.

Santos, Montenegro e Silva (2011) observaram na bacia do rio Ipanema, localizada no semiárido pernambucano, que a presença de vegetação ou de impedimentos ao livre escoamento no solo influenciou na contenção do escoamento superficial e proporcionou o incremento de umidade. Isso corrobora para a ideia de que solos com presença de vegetação densa apresentam maior teor de umidade.

Por outro lado, a umidade do solo expressa em termos de grau de saturação do solo mostra pouca variação em termos de valores médios por URH (varia de 23 a 31%).

A Figura 12 apresenta a umidade do solo média anual calculada pelo MGB-IPH para todo o período simulado, em termos de valor médio na bacia, e sua relação com a precipitação média

anual. A umidade do solo varia entre 71 e 254 mm, com variabilidade interanual respondendo diretamente à precipitação. A média de umidade do solo anual é de 142 mm, que corresponde a 17% da precipitação média anual de 837 mm. Em termos de valores médios mensais, a umidade do solo simulada é fortemente sazonal (maiores valores de março a maio e menores de setembro a dezembro), respondendo como esperado à sazonalidade da precipitação (Figura 13), mas com defasagem no tempo. Essa sazonalidade marcante do armazenamento de água no solo é também apontada nas estimativas de Rossato, Alvalá e Tomasella (2004) para a região Nordeste de forma geral para o período 1971 a 1990.

A distribuição espacial da umidade do solo simulada pelo modelo hidrológico mostra que os maiores valores são sistematicamente encontrados na porção sudeste e noroeste da bacia (Figura 14). Dois fatores principais contribuem para esse padrão: (i) distribuição espacial da precipitação, com maiores taxas nessas regiões da bacia (Figura 10); (ii) ocorrência de argissolos nessas áreas da bacia, seja com cobertura vegetal tipo caatinga ou atividade agrícola, cujas URHs associadas tem os maiores valores de capacidade máxima de armazenamento de água no solo.

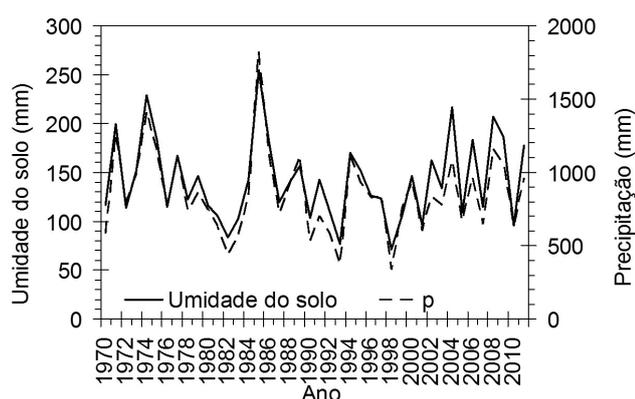


Figura 12. Umidade do solo média anual simulada na bacia do rio Piancó e precipitação observada.

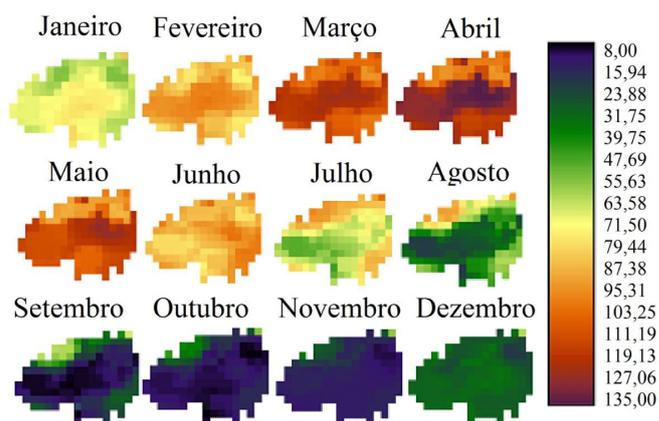


Figura 14. Distribuição da umidade do solo média mensal (mm) simulada na bacia hidrográfica do rio Piancó.

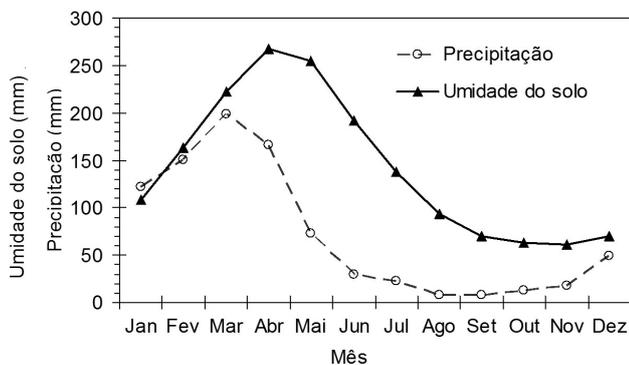


Figura 13. Umidade do solo média mensal na bacia do rio Piancó e precipitação observada.

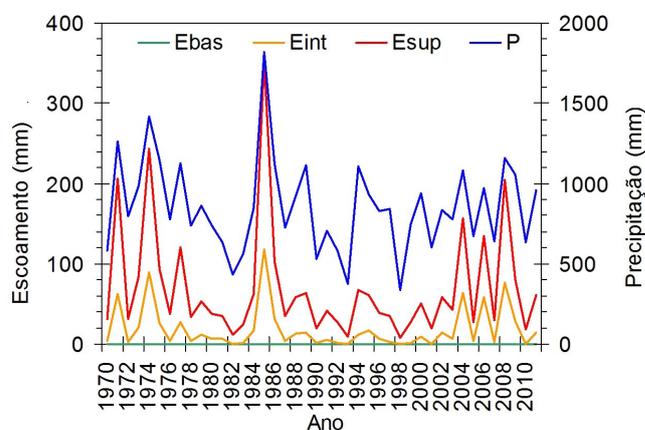


Figura 15. Escoamento médio anual superficial (Esup), intermediário (Eint) e de base (Ebas) calculado pelo MGB-IPH para bacia do rio Piancó, além da precipitação (P).

Geração de escoamento

Os resultados de geração de escoamento indicam a total predominância de geração de escoamento superficial e escoamento de base desprezível (Figura 15). Isso está de acordo com o comportamento esperado para regiões semiáridas, onde predomina a ocorrência de solos de pouca profundidade. Percebe-se ainda que a variabilidade intra-anual da geração de escoamento superficial segue a variação pluviométrica. Quanto maior o total precipitado, maior é o escoamento superficial, mas também se observa que, quanto maior a precipitação anual, maior proporção desse total é transformado em escoamento superficial. Essa proporção representa entre 2,3% e 19,4% da lâmina precipitada anual. O percentual mínimo ocorre no ano de 1998, cujo total precipitado é de 336 mm e apenas 8 mm de escoamento superficial, enquanto o percentual máximo acontece para o ano de 1985, quando ocorre um total anual de 1820 mm de precipitação e 353 mm de escoamento superficial.

A sazonalidade da geração de escoamento superficial e subsuperficial é marcante, seguindo o padrão de sazonalidade de precipitação já destacado, mas com defasagem de um mês (Figura 16). O escoamento superficial médio mensal varia de praticamente zero a 24 mm, enquanto o escoamento intermediário ou subsuperficial varia de zero a pouco mais de 6 mm.

A Tabela 7 mostra a quantidade de escoamento gerada em valores médios por URH para todo o período analisado de 1970 a 2011. Observa-se que a quantidade de água escoada é maior para a condição de atividade agrícola do que cobertura vegetal de caatinga. Por exemplo, a URH litossolo/atividade agrícola gera em média 62% mais escoamento superficial que a URH litossolo/caatinga. Tal resultado se mostra coerente, como por

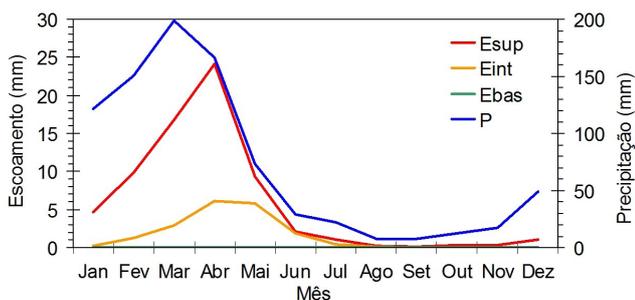


Figura 16. Escoamento superficial (Esup), intermediário (Eint) e de base (Ebas) médio mensal calculado pelo MGB-IPH e precipitação observada para bacia do rio Piancó.

Tabela 7. Geração de escoamento superficial (Esup), intermediário (Eint) e de base (Ebas) médio anual por URH.

URH	Esup (mm)	Eint (mm)	Ebas (mm)
Argissolos/caatinga	44,4	8,6	<0,1
Litossolos/caatinga	69,5	17,9	<0,1
Cambissolos/caatinga	45,1	8,1	<0,1
Argissolos/atividade agrícola	65,7	23,3	0,1
Luvissolos/atividade agrícola	98,7	33,9	0,1
Litossolo/atividade agrícola	112,9	34,6	<0,1
Água	197,1	-	-

exemplo, com o estudo de Santos, Montenegro e Silva (2011). Tais autores observaram na bacia experimental de São João do Cariri (PB) que o escoamento superficial na cobertura vegetal do tipo caatinga é menor do que em áreas com cobertura desmatada, e que em solo desmatado a taxa de infiltração é menor que o escoamento superficial. Araujo Neto et al. (2013) encontraram comportamento diferente para duas bacias experimentais localizadas no semiárido cearense. Uma das bacias foi mantida com vegetação natural (caatinga) e a outra teve a vegetação realada (eliminação de árvores com diâmetro inferior a 10 cm). Os referidos autores constataram que a bacia com vegetação nativa gerou mais escoamento, em termos de maior lâmina, mas também em termos de quantidade de eventos chuvosos que ocasionaram formação de escoamento.

Os solos litossolos apresentam maior geração de escoamento superficial, o que é esperado, já que, dentre os tipos de solo encontrados na bacia, é o que apresenta menor profundidade e, conseqüentemente, pouca capacidade de armazenamento de água, gerando, assim, maior quantidade de escoamento. Por exemplo, a URH litossolos/caatinga gera 57% mais escoamento superficial que a URH argissolos/caatinga e 54% mais que a URH cambissolos/caatinga.

CONCLUSÕES

De modo geral, pode-se concluir que o modelo hidrológico distribuído MGB-IPH representa satisfatoriamente o padrão geral do regime de vazão observado da bacia hidrográfica do rio Piancó. O modelo conseguiu simular a forte sazonalidade da bacia, a distinção do efeito de anos mais úmidos e anos mais secos em relação ao porte das cheias, o instante de tempo de subida e de descida dos hidrogramas, e a intensidade das cheias de pequeno e médio porte. Entretanto, duas dificuldades maiores foram constatadas: (i) representação dos picos das maiores cheias, seja com erro de superestimativa ou de subestimativa; (ii) representação da intermitência do rio. Essa segunda dificuldade foi mais marcante e é esperada, dado que o modelo hidrológico MGB-IPH não foi concebido, em termos da sua formulação matemática de representação dos processos hidrológicos, para rios com essa característica.

As métricas que retratam a similaridade entre vazões calculadas e observadas apresentam valores semelhantes às demais aplicações do modelo para bacias de rios perenes. A exceção é o coeficiente NSlog, cujo valor negativo obtido nesta pesquisa é função da natureza da função logarítmica não se mostrar adequada para aplicação no cálculo de desvios entre vazões calculadas e observadas para rios intermitentes.

A despeito do pouco detalhamento adotado em termos da representação das características físicas de solo e cobertura vegetal e da ausência de comparação sistemática com dados de campo, os processos hidrológicos intermediários à transformação chuva-vazão (evapotranspiração, armazenamento de água no solo e geração de escoamento) se mostram coerentes em termos de sazonalidade, magnitude e distribuição espacial na bacia hidrográfica.

REFERÊNCIAS

- ADAM, K. N.; FAN, F. M.; PONTES, P. R.; BRAVO, J. M.; COLLISCHONN, W. Mudanças climáticas e vazões extremas na Bacia do Rio Paraná. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 20, n. 4, p. 999-1007, 2015. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v20n4.p999-1007>.
- ALLASIA, D.G.; SILVA, B.C.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C.E. *Large basin simulation experience in South America*. Wallingford: IAHS Press, 2006. (IAHS Publication, 303).
- ANDERSEN, J.; REFSGAARD, J. C.; JENSEN, K. H. Distributed hydrological modelling of the Senegal River Basin: model construction and validation. *Journal of Hydrology*, v. 247, n. 3-4, p. 200-214, 2001. [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00384-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00384-5).
- ARAUJO NETO, J. R.; ANDRADE, E. M.; PALÁCIO, H. Q.; SANTOS, J. C. N.; LOBATO, F. O. Análise comparativa do escoamento superficial de microbacias experimentais em clima semiárido tropical. *Water Resources and Irrigation Management*, v. 2, n. 3, p. 111-120, 2013.
- BEZERRA, H. N. *Estimativa de evapotranspiração espacial em um região semiárida utilizando sensoriamento remoto*. 2013. 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2013.
- BRAVO, J. M.; ALLASIA, D.; PAZ, A. R.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M. Coupled hydrologic-hydraulic modelling of the Upper Paraguay River Basin. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 17, n. 5, p. 635-646, 2012. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000494](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000494).
- BRAVO, J. M.; PAZ, A. R.; COLLISCHONN, W.; UVO, C. B.; PEDROLLO, O. C.; CHOU, S. C. Incorporating forecasts of rainfall in two hydrologic models used for medium-range streamflow forecast. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 14, n. 5, p. 435-445, 2009. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000014](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000014).
- COLLISCHONN, W. *Simulação hidrológica de grandes bacias*. 2001. 270 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.
- COLLISCHONN, W.; ALLASIA, D.; SILVA, B. C.; TUCCI, C. E. M. The MGB-IPH model for large-scale rainfall-runoff modelling. *Hydrological Sciences Journal*, v. 52, n. 5, p. 878-895, 2007. <http://dx.doi.org/10.1623/hysj.52.5.878>.
- COLLISCHONN, W.; HAAS, R.; ANDREOLLI, I.; TUCCI, C. E. M. Forecasting river Uruguay flow using rainfall forecasts from a regional weather-prediction model. *Journal of Hydrology*, v. 305, n. 1-4, p. 87-98, 2005. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.08.028>.
- CRISS, R. E.; WINSTON, W. E. Do Nash values have value? Discussion and alternate proposals. *Hydrological Processes*, v. 22, n. 14, p. 2723-2725, 2008. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.7072>.
- ESCARIÃO, R. D.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; AZEVEDO, J. R. G.; RIBEIRO NETO, A. Influência do modelo hidrológico na avaliação da sensibilidade dos recursos hídricos a cenários de mudanças climáticas em região semiárida. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 17, n. 3, p. 81-91, 2013. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v17n3.p81-91>.
- FAN, F. M.; COLLISCHONN, W. Integração do Modelo MGB-IPH com Sistema de Informação Geográfica. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 19, n. 1, p. 243-254, 2014. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v19n1.p243-254>.
- FAN, F. M.; COLLISCHONN, W.; JIMÉNEZ, K. Q.; SORRIBAS, M.; BUARQUE, D.; SIQUEIRA, V. Flood forecasting on the Tocantins River using ensemble rainfall forecasts and real-time satellite rainfall estimates. *Journal of Flood Risk Management*, 2015a. No prelo. <http://dx.doi.org/10.1111/jfr3.12177>.
- FAN, F.M.; SCHWANENBERG, D.; COLLISCHONN, W.; WEERTS, A. Verification of inflow into hydropower reservoirs using ensemble forecasts of the TIGGE database for large scale basins in Brazil. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, v. 4, p. 196-227, 2015b.
- FOLHES, M. T.; RENNÓ, C. D.; SOARES, J. V. Remote sensing for irrigation water management in the semi-arid Northeast of Brazil. *Agricultural Water Management*, v. 96, n. 10, p. 1398-1408, 2009. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2009.04.021>.
- GETIRANA, A. V.; ROTUNNO FILHO, O. C.; MANSUR, W. J. Calibração e validação de modelo hidrológico com observações in situ, altimetria e gravimetria espaciais. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 16, n. 1, p. 29-45, 2011. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v16n1.p29-45>.
- IBI ENGENHARIA CONSULTIVA S/S. *Diagnóstico da Bacia do Rio Piranhas-Açu*. elaboração do Plano de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Piranhas-Açu. Fortaleza, 2013. Relatório Parcial: RP-03.
- LANNA, A. E. *MODHAC: Modelo Hidrológico Auto-Calibrável*. Porto Alegre: IPH/UFRGS, 1997. 55 p.
- LIANG, X.; LETTENMAIER, D. P.; WOOD, E. F.; BURGESS, S. A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. *Journal of Geophysical Research*, v. 99, n. 7, p. 14415-14428, 1994. <http://dx.doi.org/10.1029/94JD00483>.
- LIMA SOBRINHO, M. A. *Avaliação dos efeitos da disponibilidade espacial e temporal dos dados hidrológicos sobre a calibração de um modelo distribuído na bacia do rio Ipanema*. 2012. 113 f. Dissertação (Mestrado

- em Recursos Hídricos e Saneamento) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2012.
- LIU, Z.; TODINI, E. Towards a comprehensive physically-based rainfall-runoff model. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 6, n. 5, p. 859-881, 2002. <http://dx.doi.org/10.5194/hess-6-859-2002>.
- MELLER, A.; BRAVO, J. M.; COLLISCHONN, W. Assimilação de dados de vazão na previsão de cheias em tempo-real com o modelo hidrológico MGB-IPH. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 17, n. 3, p. 209-224, 2012. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v17n3.p209-224>.
- MELLER, A.; COLLISCHONN, W.; FAN, F. M.; BUARQUE, D.; PAIVA, R.; DIAS, P.; MOREIRA, D. Previsão de cheias por conjunto em curto prazo. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 19, n. 3, p. 33-49, 2014. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v19n3.p33-49>.
- MOLLE, F. *Marcos históricos e reflexões sobre a açudagem e seu aproveitamento*. Recife: SUDENE, 1994.
- NÓBREGA, M. T.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M.; PAZ, A. R. Uncertainty in climate change impacts on water resources in the Rio Grande Basin, Brazil. *Hydrology and Earth System Sciences*, v. 15, n. 2, p. 585-595, 2011. <http://dx.doi.org/10.5194/hess-15-585-2011>.
- PAIVA, R. C. D.; COLLISCHONN, W.; BUARQUE, D. C. Validation of a full hydrodynamic model for large scale hydrologic modelling in the Amazon. *Hydrological Processes*, v. 27, n. 3, p. 333-346, 2013. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.8425>.
- PAZ, A. R.; COLLISCHONN, W. River reach length and slope estimates for large-scale hydrological models based on a relatively high-resolution digital elevation model. *Journal of Hydrology*, v. 343, n. 3-4, p. 127-139, 2007. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.06.006>.
- PAZ, A. R.; COLLISCHONN, W.; SILVEIRA, A. L. L. Improvements in large scale drainage networks derived from digital elevation models. *Water Resources Research*, v. 42, n. 8, p. W08502, 2006. <http://dx.doi.org/10.1029/2005WR004544>.
- PEREIRA, M.; KAYSER, R. B.; COLLISCHONN, W. Integração do modelo hidrológico para grandes bacias MGB-IPH e Sistemas de Informação Geográfica para suporte à decisão de outorga de direito de uso da água. *Revista de Gestão de Água da América Latina*, v. 9, n. 2, p. 21-33, 2012.
- PONTES, P. R. M.; COLLISCHONN, W.; FAN, F. M.; PAIVA, R. C. D.; BUARQUE, D. C. Modelagem hidrológica e hidráulica de grande escala com propagação inercial de vazões. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 20, n. 4, p. 888-904, 2015. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v20n4.p888-904>.
- RIBEIRO NETO, A. *Simulação Hidrológica na Amazônia*. 2006. 178 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.
- RIBEIRO NETO, A.; BARBOSA, R. I.; FILHO, P. F. A.; CIRILO, J. A. Uso do modelo hidrológico de grandes bacias (MGB-IPH) em regiões semiáridas. In: CONFERÊNCIA INTERNACIONAL SOBRE ÁGUA EM REGIÕES ÁRIDAS E SEMIÁRIDAS, 2., 2007, Gravatá. *Anais... Pernambuco: Associação Brasileira de Recursos Hídricos*, 2007.
- ROSSATO, L.; ALVALÁ, R. C. S.; TOMASELLA, J. Variação espaço-temporal da umidade do solo no Brasil: análise das condições médias para o período de 1971-1990. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 19, n. 2, p. 113-122, 2004.
- SALDANHA, C.; TUCCI, C.; WOOD, E.; LI, H. Previsão de longo prazo da umidade do solo no rio Uruguai. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 17, n. 4, p. 39-47, 2012. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v17n4.p39-47>.
- SANTOS, T. E. M.; MONTENEGRO, A. A. A.; SILVA, D. D. Umidade do solo no semiárido pernambucano usando-se reflectometria no domínio do tempo (TDR). *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 15, n. 7, p. 670-679, 2011.
- SCHAEFLI, B.; GUPTA, H. V. Do Nash values have value? *Hydrological Processes*, v. 21, n. 15, p. 2075-2080, 2007. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.6825>.
- SILANS, A. M. B. P.; ALMEIDA, C. N.; ALBUQUERQUE, D. J. S.; PAIVA, A. E. D. B. Aplicação do modelo hidrológico distribuído AÇUMOD à bacia Hidrográfica do rio do peixe - estado da Paraíba. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 5, n. 3, p. 5-19, 2000.
- SILVA, B. B.; BRAGA, A. C.; BRAGA, C. C.; OLIVEIRA, L. M. M.; GALVÍNCIO, J. D.; MONTENEGRO, S. M. G. L. Evapotranspiração e estimativa da água consumida em perímetro irrigado do semiárido brasileiro por sensoriamento remoto. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 47, n. 9, p. 1218-1226, 2012. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2012000900006>.
- SILVA, B. C. *Previsão hidroclimática de vazão para a bacia do rio São Francisco*. 2005. 258 f. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.
- SILVA, B. C.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T.; CORBO, M. D. Previsão hidroclimática de vazão de curto prazo na bacia do rio São Francisco. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 12, n. 3, p. 31-41, 2007. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v12n3.p31-41>.
- TODINI, E. The ARNO rainfall-runoff model. *Journal of Hydrology*, v. 175, n. 1-4, p. 293-338, 1996. [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694\(96\)80016-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694(96)80016-3).

TUCCI, C. E. M. *Modelos hidrológicos*. 2. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 1998. 678 p.

TUCCI, C. E. M.; CLARKE, R. T.; COLLISCHONN, W.; DIAS, P. L. S.; SAMPAIO, G. Long term flow forecast based on climate and hydrological modeling: Uruguay river basin. *Water Resources Research*, v. 39, n. 7, p. 1181, 2003. <http://dx.doi.org/10.1029/2003WR002074>.

UFPB – UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA. *Regionalização de vazões características de longo termo para os rios da sub-bacia 37*. João Pessoa, 2011. 40 p. Convênio n. 0007/2000 entre a ANEEL e a Universidade Federal da Paraíba – Campus II.

VAN DER KNIJFF, J. M.; YOUNIS, J.; ROO, A. P. J. LISFLOOD: a GIS-based distributed model for river basin scale water balance and flood simulation. *International Journal of Geographical Information Science*, v. 24, n. 2, p. 189-212, 2010. <http://dx.doi.org/10.1080/13658810802549154>.

VINEY, N. R.; SIVAPALAN, M. Modelling catchment processes in the Swan–Avon river basin. *Hydrological Processes*, v. 15, n. 13, p. 2671-2685, 2001. <http://dx.doi.org/10.1002/hyp.301>.

ZUBIETA, R.; GETIRANA, A.; ESPINOZA, J. C.; LAVADO, W. Impacts of satellite-based precipitation datasets on rainfall–runoff modeling of the Western Amazon basin of Peru and Ecuador. *Journal of Hydrology*, v. 528, p. 599-612, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.06.064>.

Contribuição dos autores

Vagner de Souza Felix: Realizou pesquisa bibliográfica, coleta e análise de dados, calibração e ajuste do modelo hidrológico, discussão de resultados e escrita do artigo.

Adriano Rolim da Paz: Professor orientador, contribuiu na adaptação de rotinas computacionais, discussão de resultados e escrita do artigo.