



Modelagem hidrológica na bacia hidrográfica do Rio Aiuruoca, MG¹

Marcelo R. Viola², Carlos R. de Mello², Fausto W. Acerbi Jr.³ & Antônio M. da Silva²

RESUMO

A simulação do comportamento hidrológico de bacias hidrográficas consiste em uma das principais ferramentas na gestão dos recursos hídricos, devido à possibilidade de predição do regime fluvial. A bacia em estudo está localizada na região Alto Rio Grande, Sul de Minas Gerais, com área de drenagem de 2.094 km², constituindo uma das bacias fundamentais de drenagem para o reservatório da Usina Hidrelétrica de Camargos (UHE – Camargos/CEMIG). Neste contexto se objetivou desenvolver e aplicar um modelo hidrológico semi-conceitual, na forma semi-distribuída, para simular o comportamento hidrológico da bacia do Rio Aiuruoca, com apoio dos SIGs e sensoriamento remoto, disponibilizando uma ferramenta útil para o gerenciamento e planejamento dos recursos hídricos na região. Os resultados do coeficiente estatístico de Nash-Sutcliffe (C_{NS}) foram de 0,87 e 0,92 para as etapas de calibração e verificação, respectivamente, o que, de acordo com a classificação proposta para modelos hidrológicos de simulação, permite qualificá-lo para simulação do comportamento hidrológico na bacia hidrográfica do Rio Aiuruoca.

Palavras-chave: hidrologia, escoamento, modelos hidrológicos

Hydrologic modeling in the Aiuruoca river basin, Minas Gerais State

ABSTRACT

The hydrological simulation of watersheds is one of the most important tools for water resources management due to the possibility of flow regime prediction. The Aiuruoca river basin is located in the Alto Rio Grande Basin, southern Minas Gerais State, with 2,094 km² of drainage area, and is very important drainage basin into the Camargos Hydropower Plant Reservoir (UHE – Camargos/CEMIG). In this context, this work had the objective of developing and applying a semi-conceptual hydrologic model, in semi-distributed approach, for hydrologic simulation in the Aiuruoca river basin, based on GIS and Remote Sensing tools, thus creating an important tool for management and planning of water resources in the region. The Nash-Sutcliffe coefficients (C_{NS}), respectively, for calibration and validation periods, were 0.87 and 0.92, showing that the model is able to simulate the hydrologic impacts on the basin, predicting its condition for feeding of the Camargos Reservoir.

Key words: hydrology, runoff, hydrologic models

¹ Parte da Dissertação de Mestrado do primeiro autor, apresentada à UFLA, com bolsa do CNPq/CT-Hidro

² DEG/UFLA, CP 3037, CEP 37200-000, Lavras, MG. Fone: (35) 3829-1452. E-mail: mrviola@eagricola.ufla.br; crmello@ufla.br; marciano@ufla.br

³ DCF/UFLA, CP 3037, CEP 37200-000, Lavras, MG. Fone: (35) 3829-1411. E-mail: fausto@ufla.br

INTRODUÇÃO

O Brasil é um país tropical considerado úmido na maior parte de seu território, com grandes rios, cuja importância está fortemente associada à geração de energia elétrica, uma vez que sua fonte hidro-energética é responsável por mais de 70% da energia consumida. Percebe-se, portanto, que o entendimento e a capacidade de predição do regime hidrológico das bacias hidrográficas são altamente relevantes para o planejamento energético interno. Do ponto de vista agrícola, a simulação hidrológica representa importante ferramenta no contexto de gestão dos recursos hídricos, especialmente para caracterização de vazões de outorga para projetos de irrigação. A avaliação dos impactos nos recursos hídricos produzidos por diferentes usos agrícolas do solo consiste em uma das aplicações mais relevantes dos modelos hidrológicos, fundamental para o planejamento ambiental da bacia hidrográfica.

Uma das formas mais comuns de avaliação do comportamento hidrológico de bacias hidrográficas consiste do desenvolvimento e aplicação de modelos fisicamente baseados com auxílio de técnicas de mapeamento, combinando outros modelos, tais como CN-SCS (Easton et al., 2008; Notter et al., 2007; Stackelberg et al., 2007), ARNO (Collischonn et al., 2007), além de certos modelos físicos para descrever o comportamento da infiltração e propagação do escoamento (Pruski et al., 2001), para o que são necessárias séries históricas de precipitação e evapotranspiração a fim de simular o comportamento das vazões a partir de um balanço hídrico, tendo-se determinada camada de solo como controle (Ribeiro Neto, 2006). Este tipo de investigação científica é altamente aceita, em especial quando técnicas de SIG e sensoriamento remoto são aplicadas para espacializar as variáveis de entrada do modelo, consistindo no estado-da-arte do conhecimento na área de engenharia de água e solo e recursos hídricos (Stackelberg et al., 2007; Green et al., 2006; Marsik & Waylen, 2006).

Alguns modelos fisicamente baseados têm sido desenvolvidos e aplicados para simulação hidrológica em diversas bacias hidrográficas, tais como SWAT (Stackelberg et al., 2007; Bormann et al., 2007; Green et al., 2006), NRM3 Streamflow (Notter et al., 2007), annAGNPS (Licciardello et al., 2007), CASC2D (Marsik & Waylen, 2006) e MGB/IPH (Collischonn et al., 2007); contudo e de acordo com Notter et al., (2007) e Marsik & Waylen (2006), para aplicação de alguns desses modelos são oportunos dados de entrada de alta qualidade, especialmente de parâmetros de solo de difícil e dispendiosa determinação e séries históricas climáticas completas espacialmente distribuídas, dentre outros; por outro lado, os modelos supracitados são complexos, com vários parâmetros de calibração, podendo demandar muito tempo e equipamentos laboratoriais específicos para levantamento de alguns dados, tornando sua aplicação limitada (Notter et al., 2007; Thanapakpawin et al., 2007).

Neste contexto se objetivou desenvolver um modelo hidrológico para simulação dos recursos hídricos, avaliando sua capacidade preditiva na bacia hidrográfica do Rio Aiuruoca, um dos principais contribuintes para o reservatório da UHE

de Camargos/CEMIG, gerando uma ferramenta simples e de boa precisão.

MATERIAL E MÉTODOS

Descrição do modelo hidrológico

O modelo hidrológico semi-conceitual desenvolvido foi baseado nos modelos CN-SCS, modificado por Mishra et al. (2006), e MGB-IPH (Collischonn et al., 2007), operando com formulação semi-distribuída e intervalo de simulação diário. O balanço hídrico considerado é o seguinte:

$$A_{t+1} = A_t + (P - D_{SUP} - D_{SS} - D_B - ET) \times \Delta t \quad (1)$$

em que A_{t+1} é o armazenamento de água no solo no tempo $t+1$; A_t é o armazenamento no tempo anterior t ; P é a precipitação, descontada a interceptação; D_{SUP} é a lâmina de escoamento superficial direto; D_{SS} é a lâmina de escoamento subsuperficial; D_B é a lâmina de escoamento base ou subterrâneo e ET é a evapotranspiração e Δt é o intervalo ou passo de simulação. Todos os componentes estão em mm.

A modelagem possui três módulos básicos, em que o primeiro está associado à D_{SUP} , D_{SS} e D_B , que deixam a camada de solo considerada no balanço hídrico; o segundo módulo visa contemplar o efeito de retardamento nos reservatórios, o que é simulado no modelo pela passagem por reservatórios lineares simples, como descrito no modelo MGB/IPH, enquanto no último é realizada a propagação na calha fluvial pelo modelo vazão-vazão Muskingan-Cunge Linear, na forma descrita por Collischonn et al. (2007).

A estrutura de escoamento superficial direto foi desenvolvida com base no Método Curva-Número (CN-SCS), adaptado por Mishra et al. (2006), os quais aperfeiçoaram a relação entre a abstração inicial (I_a) e o potencial de armazenamento de água no solo (S), incorporando a umidade antecedente (M), como função da precipitação acumulada nos últimos 5 dias (P_5); assim, a estimativa do deflúvio superficial direto pode ser obtida pela seqüência de equações:

$$D_{SUP} = \frac{(P_t - I_a) \cdot (P_t - I_a + M)}{P_t - I_a + M + S} \quad (2)$$

$$M = 0,5 \cdot \left(- (1 + \lambda) \cdot S + \sqrt{(1 - \lambda)^2 \cdot S^2 + 4 \cdot P_5 \cdot S} \right) \quad (3)$$

$$I_a = \frac{\lambda \cdot S_2}{S + M} \quad (4)$$

$$S = (\theta_s - \theta_0) \cdot h \quad (5)$$

$$A_m = (\theta_s - \theta_{PMP}) \cdot h \quad (6)$$

$$S = A_m - A_t \quad (7)$$

O valor de S corresponde ao armazenamento de água no solo compreendido entre a umidade de saturação (θ_s) e a atual (θ_0) e, de acordo com as equações 5 e 6, pode ser estimado

em função de A_m , e do armazenamento atual de água no solo (A_t), que é atualizado a cada intervalo de tempo no balanço hídrico. Segundo Misrha et al. (2006) e Mello et al. (2003), o parâmetro abstração inicial (λ) pode variar de 0 a 0,5 sendo, portanto, calibrável.

Adotou-se, para estimativa dos escoamentos subterrâneo e subsuperficial, a metodologia proposta por Rawls et al. (1993), também aplicada no modelo MGB-IPH e pelo modelo desenvolvido por Thanapakpawin et al. (2007), expressas pelas seguintes equações:

$$D_B = K_B \cdot \left(\frac{A_t - A_c}{A_m - A_c} \right) \quad (8)$$

$$D_{SS} = K_{SS} \cdot \left(\frac{A_t - A_{cc}}{A_m - A_{cc}} \right)^{\left(3 + \frac{2}{Pr}\right)} \quad (9)$$

em que, K_B e K_{SS} são os parâmetros de escoamento subterrâneo e subsuperficial, respectivamente, em mm dia⁻¹, e calibráveis devido às incertezas que envolvem tais parâmetros, conforme Thanapakpawin et al. (2007) e Collischonn et al. (2007). A_c e A_{cc} se referem ao armazenamento de água no solo a partir do qual ocorre escoamento subterrâneo e subsuperficial, respectivamente, fixados em 10% de A_m , de acordo com Ribeiro Neto (2006) que trabalhou diretamente com o modelo MGB/IPH, e Pr é um índice de porosidade do solo obtido com base na literatura.

Base de dados hidro-climáticos para alimentação do modelo

Para o desenvolvimento do modelo hidrológico chuva-vazão, são necessários dados monitorados de precipitação e evapotranspiração para alimentação do modelo, e de vazão para calibração e verificação. Séries históricas de vazão e precipitação foram obtidas junto à Agência Nacional de Águas (ANA), e de evapotranspiração de referência, junto ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET/5°DISME).

A estimativa da precipitação interceptada pela cobertura vegetal foi realizada de forma semelhante à do modelo SWAT (Stackelberg et al., 2007) e MGB-IPH (Collischonn et al., 2007), considerada função linear do índice de área foliar, enquanto para obtenção da precipitação média na bacia se usou a metodologia dos Polígonos de Thiessen, determinando-se a área de influência de cada posto pluviométrico, com auxílio do SIG ArcGIS.

O módulo de evapotranspiração do modelo hidrológico foi desenvolvido, basicamente, em função dos dados climatológicos disponíveis, consistindo de uma série histórica de evapotranspiração de referência (ET_o), calculada pela metodologia de Penman-Monteith, de acordo com Allen et al. (1998), referente ao único posto de monitoramento climatológico oficial na região (INMET/5°DISME), localizado na cidade de Lavras, MG. A determinação da evapotranspiração real foi realizada com base na ET_o, coeficiente de cultura (Tabela 1) e coeficiente de umidade do solo (k_s), o qual considera um decaimento exponencial da evapotranspiração a partir de um armazenamento limite de água no solo (A_L), tendo como limite inferior o armazenamento do ponto de

murcha (A_{pmp}). Shuttleworth (1993) utilizou uma abordagem diferenciada, porém regida pelos mesmos limites, adotando um valor para A_{pmp} equivalente a 10% da capacidade de armazenamento de água no solo (A_m), e A_L igual a 50% de A_m , sendo que, neste trabalho, ditos valores também foram adotados. A obtenção de k_s , nas situações em que $A_t < A_L$, foi realizada por:

$$k_s = \frac{\ln(A_t - A_{pmp})}{\ln(A_L - A_{pmp})} \quad (10)$$

Séries históricas diárias de precipitação, vazão e evapotranspiração de referência, foram estruturadas abrangendo o período de 1990 a 2003; o período entre 1991 e 2000, foi utilizado para calibração do modelo e os dois últimos anos da série para verificação. Devido a uma inconsistência no hidrograma observado, descartou-se o período compreendido entre 07/1999 e 01/2000; além disto, o desconhecimento das condições iniciais, principalmente de umidade do solo, determinou a utilização de um período de aquecimento (*warm up*), correspondendo aos anos de 1990 e 2000, respectivamente para calibração e verificação (Zhang et al., 2007; Stackelberg et al., 2007; Notter et al., 2007).

Aplicação e avaliação do desempenho do modelo

Os parâmetros que compõem o modelo hidrológico são divididos em fixos, quando sua obtenção é realizada com base na literatura ou em medidas “in loco”, e calibráveis, os quais são freqüentemente obtidos por ajuste matemático, demandando a existência de monitoramento hidrológico.

A formulação final do modelo conta com cinco parâmetros calibráveis: parâmetros de escoamento subsuperficial (K_{SS}) e subterrâneo (K_B), parâmetros de calibração da propagação dos reservatórios superficial (C_{SUP}) e subsuperficial (C_{SS}), e parâmetro de abstração inicial (λ). O processo de calibração adotado foi o automático, buscando-se a maximização do coeficiente estatístico Nash-Sutcliffe (Nash & Sutcliffe, 1970). A calibração foi realizada por sub-bacias empregando-se dados do posto fluviométrico Fazenda Laranjeiras e respeitando a faixa de variação física dos parâmetros, descrita na literatura.

O processo de validação de modelos hidrológicos depende das aplicações pretendidas mas, para se obter uma medida da eficácia da simulação nos testes, é conveniente que coeficientes estatísticos sejam utilizados, com destaque na condição de simulação hidrológica chuva-vazão, para o coeficiente de Nash-Sutcliffe (C_{NS}) e de sua versão logarítmica ($\log(C_{NS})$), cujas equações são apresentadas na seqüência; desta maneira, depois de calibrado o modelo foi submetido a verificação, que consiste na simulação de um período diferente do usado para a calibração.

De acordo com Zhang et al. (2007) e Legates & McCabe (1999), o valor de C_{NS} indica o ajustamento dos dados simulados aos observados na reta 1:1, podendo variar de $-\infty$ a 1. Gotschalk et al. (1999) apresentam a seguinte classificação para este coeficiente: $C_{NS} = 1$ corresponde a um ajuste perfeito; $C_{NS} > 0,75$ o modelo é considerado adequado e bom; $0,36 < C_{NS} < 0,75$ o modelo é considerado aceitável; entretanto,

segundo Zappa (2002), valores de C_{NS} acima de 0,5 qualificam o modelo para simulação.

$$C_{NS} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{OBS_i} - Q_{CALC_i})^2}{\sum_{i=1}^N (Q_{OBS_i} - \overline{Q_{OBS}})^2} \quad (11)$$

$$\log(C_{NS}) = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (\log(Q_{OBS_i}) - \log(Q_{CALC_i}))^2}{\sum_{i=1}^N (\log(Q_{OBS_i}) - \overline{\log(Q_{OBS})})^2} \quad (12)$$

Complementarmente à verificação, compararam-se dados observados aos estimados freqüentemente extraídos do hidrograma, com destaque para curva de permanência e vazões máximas e mínimas diárias anuais.

Caracterização geomorfológica da bacia hidrográfica do Rio Aiuruoca – levantamento de dados para o modelo de simulação

O Rio Aiuruoca é um dos afluentes de maior relevância do rio Grande, além de um dos principais responsáveis pela manutenção dos níveis de uma seqüência de reservatórios de usinas hidrelétricas (UHE^s) instaladas ao longo de seu curso, sendo fundamental para a geração de energia na região Sudeste do Brasil.

A localização da Bacia do Rio Aiuruoca está apresentada na Figura 1; o clima predominante, de acordo com a classificação de Köppen, é Cwb na cabeceira, junto à Serra da Mantiqueira, onde os índices pluviométricos ultrapassam os

2300 mm, e Cwa em grande parte da bacia, que apresenta precipitação média anual em torno de 1500 mm, dos quais cerca de 80% ocorrem no verão. A temperatura média anual é de 18 °C, com mínima média abaixo dos 13 °C no inverno (maio – setembro), e máxima média de 21 °C no verão (novembro – março).

A Bacia do Rio Aiuruoca, com seção de controle no posto fluviométrico Fazenda Laranjeiras, apresenta área de drenagem de 2094 km², sendo fundamental para manutenção dos níveis do reservatório da UHE de Camargos, além de Itutinga e Funil, localizados à jusante do primeiro.

O modelo digital de elevação (MDE) da bacia com resolução espacial de 30 m, está apresentado na Figura 2, sendo possível verificar elevações superiores a 2600 m ao sul, na região da Serra da Mantiqueira, que revela uma particularidade da bacia em estudo, é referenciada por apresentar uma das nascentes mais elevadas do País. A modelagem da bacia hidrográfica por um SIG é baseada no MDE que, por sua vez, proporciona a definição de parâmetros físicos relacionados à topografia, rede de drenagem derivada numericamente e à divisão em sub-bacias (Troch et al., 2003).

Uso do solo

O uso do solo na bacia do Rio Aiuruoca é marcado por exploração agrícola intensa ao norte, nas proximidades do reservatório de Camargos, enquanto ao sul, na Serra da Mantiqueira, ocorre predominância de floresta ombrófila e agricultura familiar.

A classificação da cobertura vegetal foi gerada a partir de imagens de satélite do ano de 2005, do sensor Landsat ETM⁺,

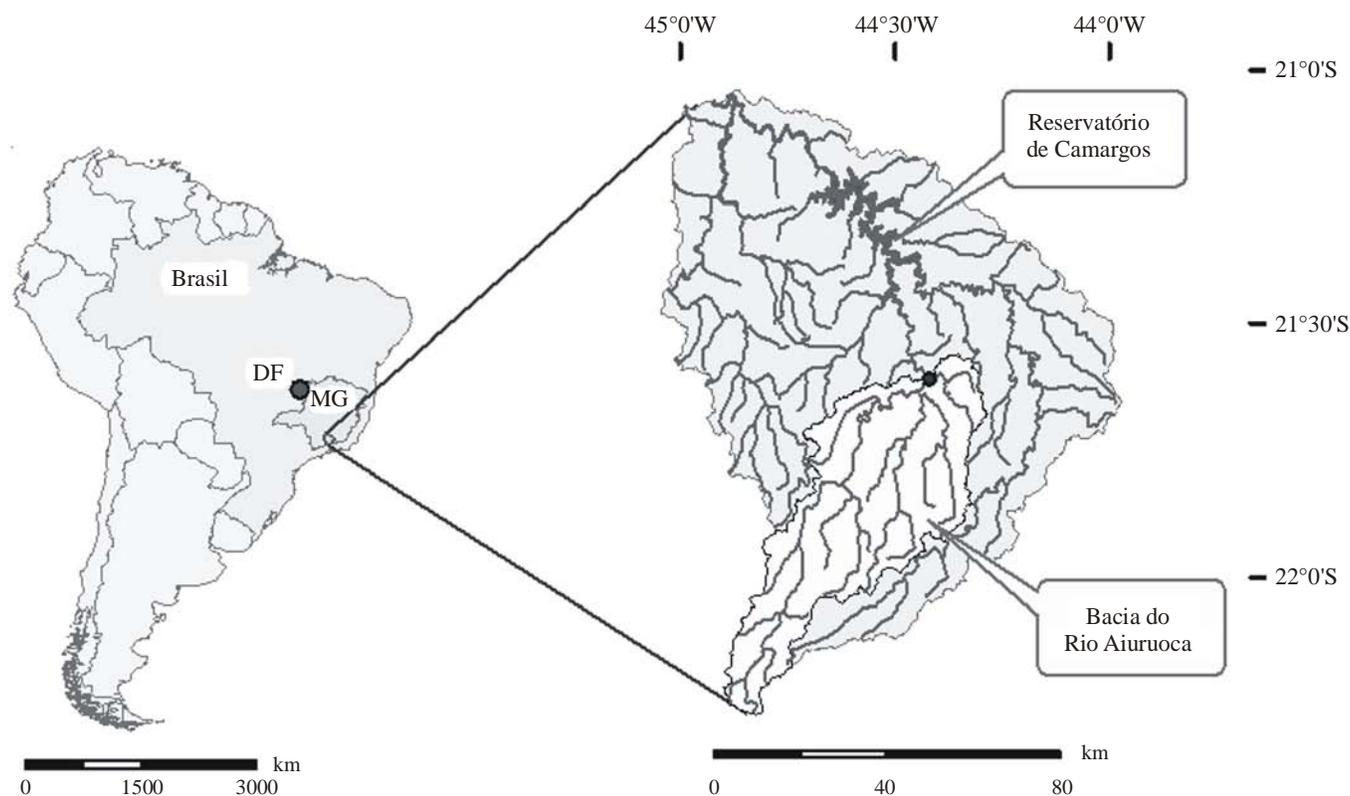


Figura 1. Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Aiuruoca no contexto continental

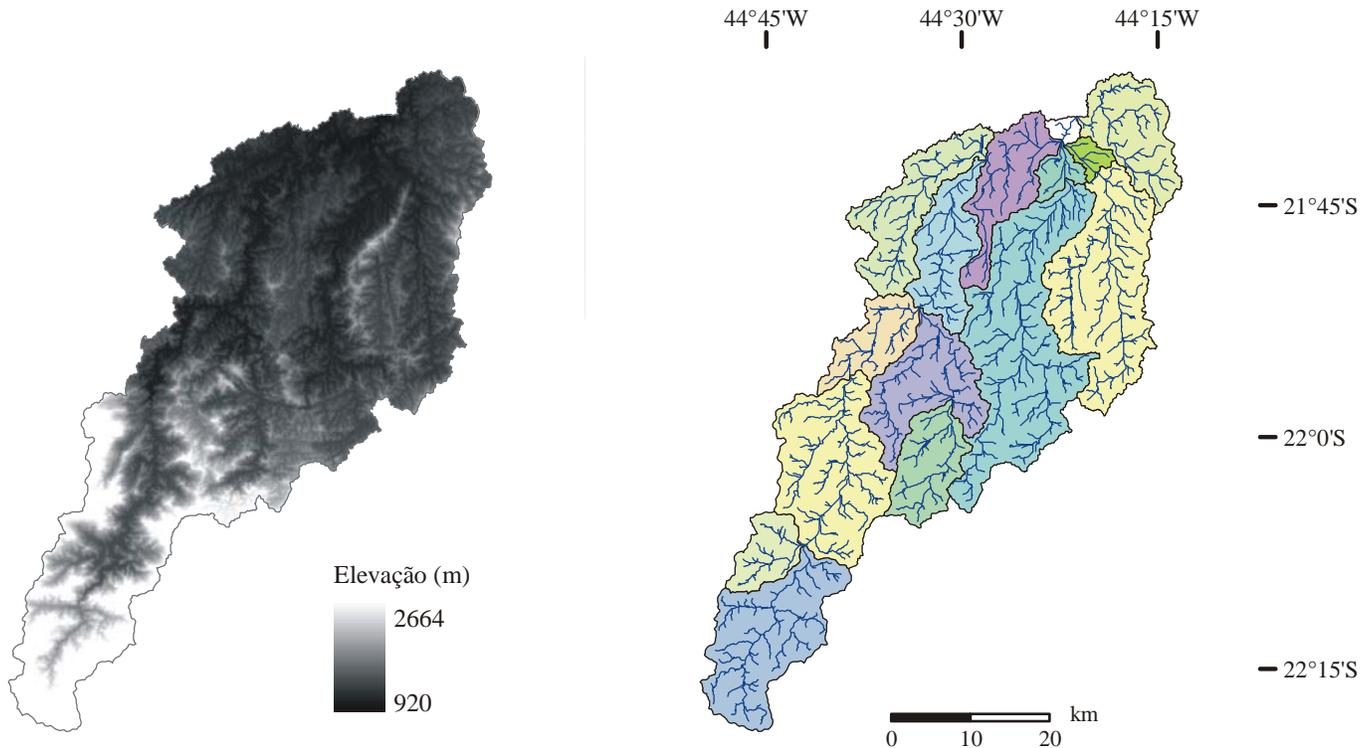


Figura 2. Modelo Digital de Elevação (MDE) da bacia do Rio Aiuruoca (esquerda) e hidrografia derivada numericamente e divisão em sub-bacias para aplicação do modelo (direita)

utilizando-se o método de classificação supervisionada da máxima verossimilhança; para isto, se coletaram amostras de treinamento, considerando-se seis classes de uso do solo: floresta, pastagem, solo com baixa cobertura vegetal, agricultura, cerrado e eucalipto. Com base neste mapa, se obtiveram, na literatura, três parâmetros fundamentais para simulação hidrológica, ou seja, o índice de área foliar (IAF), coeficiente de cultura (K_C) e a profundidade do sistema radicular (h). O mapa de cobertura vegetal está apresentado na Figura 3 e, na Tabela 1, a área ocupada pelas diferentes classes de uso do solo, diferenciadas pela cobertura vegetal, e valores dos parâmetros e respectivas fontes.

Solos

A Região Alto Rio Grande conta com levantamento de alta intensidade de solos, realizado por Araújo (2006), na escala 1:100.000. Ocorrem, na bacia em estudo, as classes de solo Cambissolo Háplico distrófico (CXbd), Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico (LVAd), Latossolo Vermelho distrófico (LVd), Neossolo Litólico distrófico (RLd), Cambissolo Húmico distrófico (CHd) e Neossolo Flúvico distrófico (RUbd).

Predominam na região os Cambissolos Háplicos que, de acordo com Araújo (2006), são ácidos, rasos e pouco desenvolvidos, apresentam permeabilidade moderada, tendendo a ocupar áreas de relevo movimentado e terços inferiores de encostas, estes associados aos Latossolos. Ao norte, próximo ao reservatório de Camargos, ocorrem Latossolos, dando suporte ao desenvolvimento de agricultura tecnificada, especialmente na região compreendida entre Andrelândia e São Vicente de Minas.

Com base em estudos prévios sobre os solos da bacia hidrográfica, conduzidos por Junqueira Júnior (2006) e Gomes (2005), é possível estimar a capacidade de armazenamento

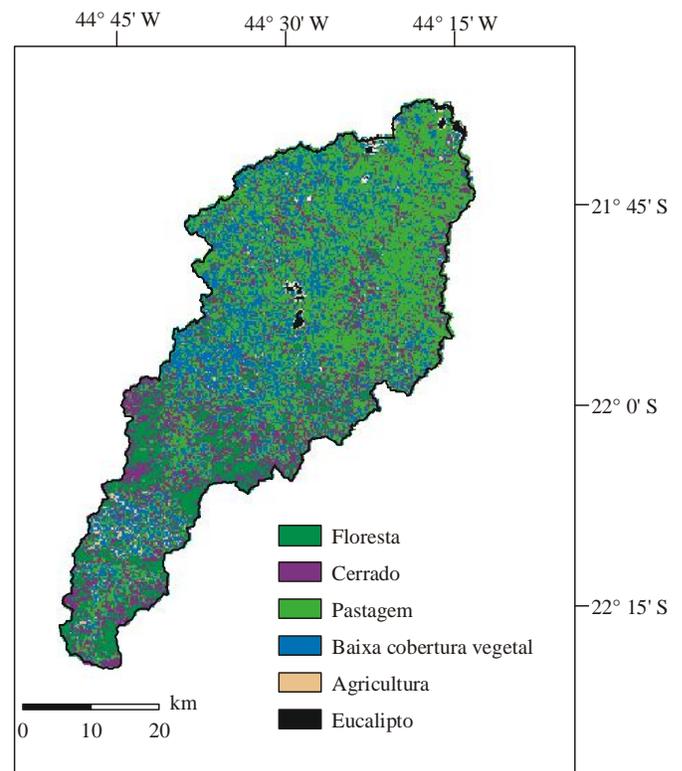


Figura 3. Classes de uso do solo diferenciadas pela diversa cobertura vegetal da bacia hidrográfica do Rio Aiuruoca

Tabela 1. Área ocupada por classe de cobertura vegetal na bacia hidrográfica do Rio Aiuruoca, parâmetros referentes à cobertura vegetal e

Cobertura vegetal	Área (%)	K_c	h (m)	IAF
Eucalipto	1,0	1 (Soares & Almeida, 2001)	1,5 (Lima, 1996)	3,5 (Soares & Almeida, 2001)
Floresta	25,7	1 (Soares & Almeida, 2001)	2 (Lima, 1996)	7,0 (Soares & Almeida, 2001)
Solo com baixa cobertura vegetal	19,7	0,3 (Allen et al., 1998)	0,3	0,3 (Zhou et al. 2005)
Pastagem	23,4	0,3 a 1* (Allen et al., 1998)	0,6 (Allen et al., 1998)	1 a 3 (Ribeiro Neto, 2006)
Agricultura	6,6	0,3 a 1,15** (Allen et al., 1998)	0,5 (Allen et al., 1998)	0,3 a 7 (Zhou et al., 2005)
Cerrado	23,6	0,7 (Lima et al., 2001)	2	1,9 (Bitencourt et al., 2008)

* Valores médios de diversas forrageiras; ** Valores para a cultura do milho durante o período de condução da cultura em sequeiro e de solo com baixa cobertura vegetal durante o restante do ano

de água no solo (A_m). No âmbito da simulação hidrológica, A_m corresponde ao armazenamento compreendido entre as umidades de saturação (θ_s) e ponto de murcha permanente

Tabela 2. Capacidade de armazenamento de água no solo (A_m), valores das umidades de saturação (θ_s) e ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) e respectivas fontes

Classede solo	θ_{PMP} ($cm^3 cm^{-3}$)	θ_s ($cm^3 cm^{-3}$)	Fonte	A_m ($mm cm^{-1}$)
Cambissolo Háptico distrófico	0,171	0,597	Junqueira Júnior (2006)	4,26
Neossolo Litólico distrófico	-	-	*	3,90
Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico	0,240	0,555	Gomes (2005)	3,15
Neossolo Flúvico distrófico	0,183	0,574	Junqueira Júnior (2006)	3,91
Latossolo Vermelho distrófico	0,230	0,580	Gomes (2005)	3,50
Cambissolo Húmico distrófico	0,159	0,571	Junqueira Júnior (2006)	4,12

* Valor inferido com base na textura em que, segundo Araújo (2006), este solo apresenta aproximadamente 80% de areia, resultando, de acordo com Rawls et al. (1993), em elevada capacidade de armazenamento, do ponto de vista estritamente hidrológico

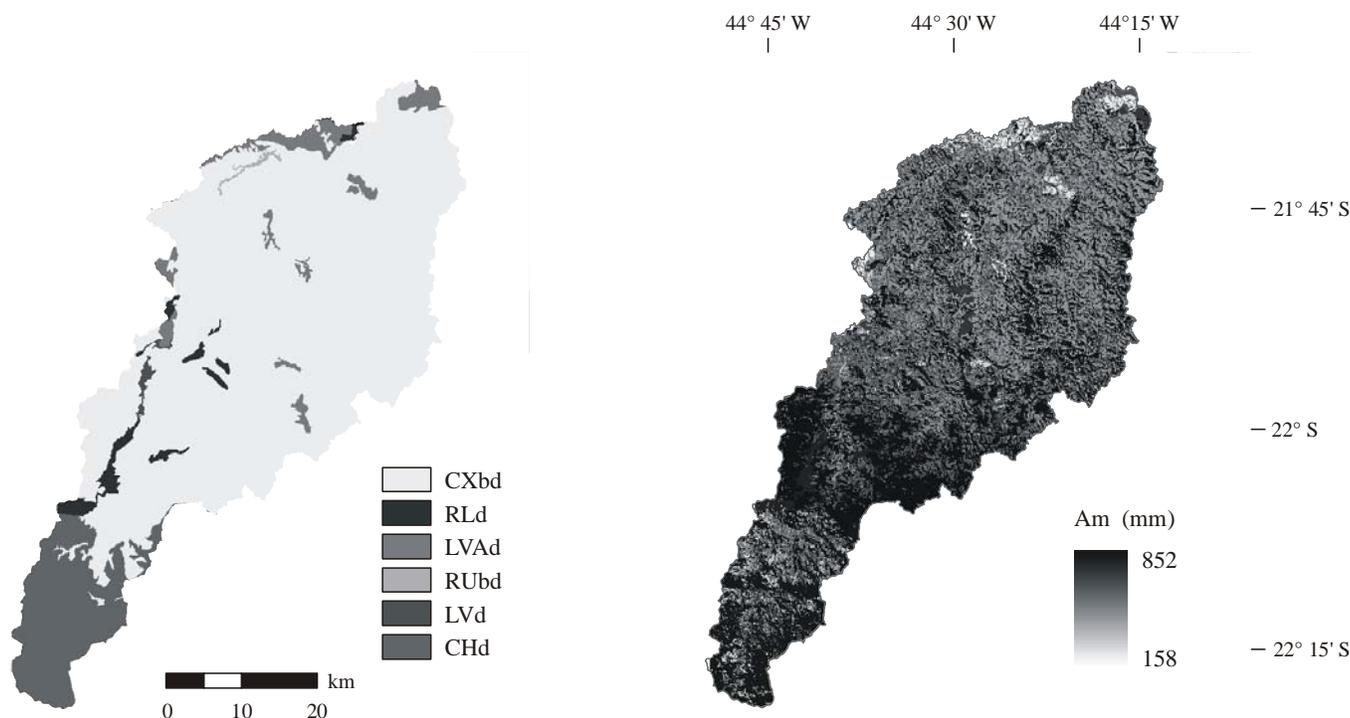
(θ_{PMP}), segundo Collischonn et al. (2007).

A Tabela 2 apresenta a capacidade de armazenamento de água por classe de solo, em mm/cm de profundidade. Para o estabelecimento final de A_m , é necessário conhecer a profundidade de controle do balanço hídrico que, de acordo com Collischonn et al. (2007), deve ser representada pela profundidade do sistema radicular (Tabela 1). Na Figura 4 se encontram os mapas de solo e de capacidade de armazenamento de água no solo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Estimativa e comportamento dos parâmetros de calibração

Tem-se, na estimativa dos parâmetros calibráveis, a maior fonte de incertezas envolvendo a simulação hidrológica, dado ao ajuste meramente numérico envolvendo a fixação de seus valores pelo método automático, visando à melhor aderência possível da série simulada à observada. Na Tabela 4 estão apresentados os valores dos parâmetros calibráveis obtidos para a Bacia Hidrográfica do Rio Aiuruoca no processo de calibração automática, e a faixa de variação permi-

**Figura 4.** Mapa de solos, à esquerda (Adaptado de Araújo, 2006), e capacidade de armazenamento de água no solo, em mm, à direita

tida, a qual respeitou os limites de variação física citados na literatura. Para os parâmetros de retardo dos reservatórios subsuperficial (C_{SS}) e superficial (C_{SUP}), não se encontrou faixa de variação na literatura, haja vista que, segundo Collis-

Tabela 3. Parâmetros calibráveis do modelo hidrológico para a Bacia do Rio Aiuruoca e faixa de variação estabelecida com base na literatura

Parâmetro	Modelo semidistribuído	Faixa de variação permitida
λ	0,01 a 0,2	0 a 0,5 (Mishra et al., 2006)
C_{SUP}	2,3 a 33,4	-
C_{SS}	2 a 600,2	-
K_{SS}	0,01 a 82,65	0 a 182,4 (Rawls et al., 1993)
K_B	0,1 a 2,5	0,03 a 2,5 (Ribeiro Neto, 2006)

chonn et al. (2007), eles são puramente empíricos.

Análise da precisão do modelo

O coeficiente C_{NS} indica a qualidade do ajuste do hidrograma simulado ao observado, com grande peso das vazões de pico; seus valores foram de 0,87 e 0,92 nos períodos de calibração e verificação, respectivamente, enquadrando o modelo na categoria Adequado e Bom, segundo classificação proposta por Gotschalk et al. (1999).

Licciardello et al. (2007), trabalhando com o modelo distribuído AGNPS em uma bacia hidrográfica na região do Mediterrâneo (Sul da Itália), obtiveram C_{NS} da ordem de 0,77 na fase de calibração e 0,80 na verificação. Notter et al. (2007), desenvolvendo e aplicando um modelo semi-distribuído baseado no método CN-SCS à região do Monte Kenya (África), obtiveram C_{NS} de 0,693 e 0,513 para calibração e verificação, respectivamente. Thanapakpawin et al. (2007), aplicando um modelo distribuído para simulação hidrológica na Tailândia, atingiram valores máximos de C_{NS} de 0,75, assim como Collischonn et al. (2005), trabalhando com o modelo MGB/IPH para a bacia do Rio Uruguai. Em todas essas situações os respectivos modelos foram considerados de boa precisão e passíveis de aplicação para simulação hidrológica nas citadas regiões; desta forma se observa que os resultados obtidos pelo modelo desenvolvido, tanto no contexto da calibração quanto, e principalmente, da verificação, foram substancialmente superiores aos obtidos pelos trabalhos citados anteriormente, sobretudo quando comparado com os de Notter et al. (2007), com a ressalva de que o modelo desenvolvido para a bacia do Rio Aiuruoca é mais simples (menos parâmetros para calibração) e com base de dados climáticos qualitativamente inferiores; assim, como o C_{NS} é a estatística de precisão mais aplicada e importante para a simulação hidrológica, pode-se concluir que o modelo produzirá bons resultados na predição do regime fluvial, sendo uma ferramenta robusta para o planejamento e gestão ambiental, não apenas na bacia do Rio Aiuruoca mas, também, para a região Alto Rio Grande, como um todo, dada às semelhanças fisiográficas da região.

O coeficiente log (C_{NS}) é altamente influenciado pelos períodos de recessão do hidrograma devido ao amortecimen-

to da amplitude proporcionada pela escala logarítmica. Nas etapas de calibração e verificação, seus valores foram de 0,92 e 0,94, respectivamente, indicando boa precisão na simulação dos períodos de recessão do hidrograma. Esta análise é fundamental para a aplicação do modelo como ferramenta para a gestão dos recursos hídricos em virtude da implicação no ajuste de curvas de permanência e vazões mínimas.

Com base nas estatísticas de precisão, o modelo hidrológico pode ser considerado de alta precisão e adequado para simulação, especialmente se analisarem os resultados da etapa de verificação, a qual é desconhecida do modelo. Outros modelos ajustados e/ou desenvolvidos com os mesmos objetivos, aplicados a bacias hidrográficas de porte semelhante e algumas com características climáticas semelhantes, como SWAT (Bormann et al., (2007) para uma bacia hidrográfica na Alemanha), CASC2D (Marsik & Waylen (2006) na Costa Rica), annAGNPS (Licciardello et al., 2007, na Itália), NRM3 Streamflow (Notter et al. (2007) no Quênia), MGB-IPH (Collischonn et al., 2005, Rio Grande do Sul) e DHSVM (Thanapakpawin et al., 2007), na Tailândia) apresentaram estatísticas de precisão semelhantes, ou mesmo inferiores, conforme já destacado, principalmente no tocante à verificação sendo, em todas as situações, considerados precisos e passíveis de aplicação.

A análise visual do hidrograma simulado frente ao observado consiste em uma importante ferramenta de avaliação do ajuste. Apresenta-se, na Figura 5, os hidrogramas simulados para a Bacia Hidrográfica do Rio Aiuruoca, no período de calibração (a) e verificação (b), e os respectivos hidrogramas observados e hietograma de precipitação média diária na bacia. Uma importante observação associada aos hidrogramas, que pode ser visualizada no período de verificação, refere-se à dificuldade de simulação das vazões de cheia, as quais são, por natureza, de difícil modelagem; esta limitação foi verificada por diversos autores (Notter et al., 2007; Stackelberg et al., 2007; Thanapakpawin et al., 2007; Bormann et al., 2007) e está relacionada principalmente à representação da distribuição espacial das chuvas e ao intervalo de simulação adotado na modelagem (passo), que é diário, motivado basicamente pelas características dos dados de monitoramento hidrológico e climático disponíveis, e que limita a resposta do modelo às vazões máximas, dado ao reduzido tempo de concentração das sub-bacias; verifica-se no entanto, boa aderência do hidrograma simulado ao observado, em especial no período de verificação, com poucos picos de vazão subestimados. É provável que a análise da distribuição espacial das chuvas, com base, por exemplo, em radares meteorológicos, possa produzir melhores resultados no tocante às vazões máximas, porém o custo de aquisição e a disponibilidade de tais dados, inviabilizariam a aplicação da simulação hidrológica à região, além de contribuir pouco com a melhoria dos valores de C_{NS} , uma vez que estes já são suficientemente elevados, mesmo com a base hidroclimática disponível na região.

A análise visual do ajuste nos períodos de recessão dos hidrogramas mostra boa aderência do hidrograma simulado ao observado, reforçando os resultados obtidos pelo coefici-

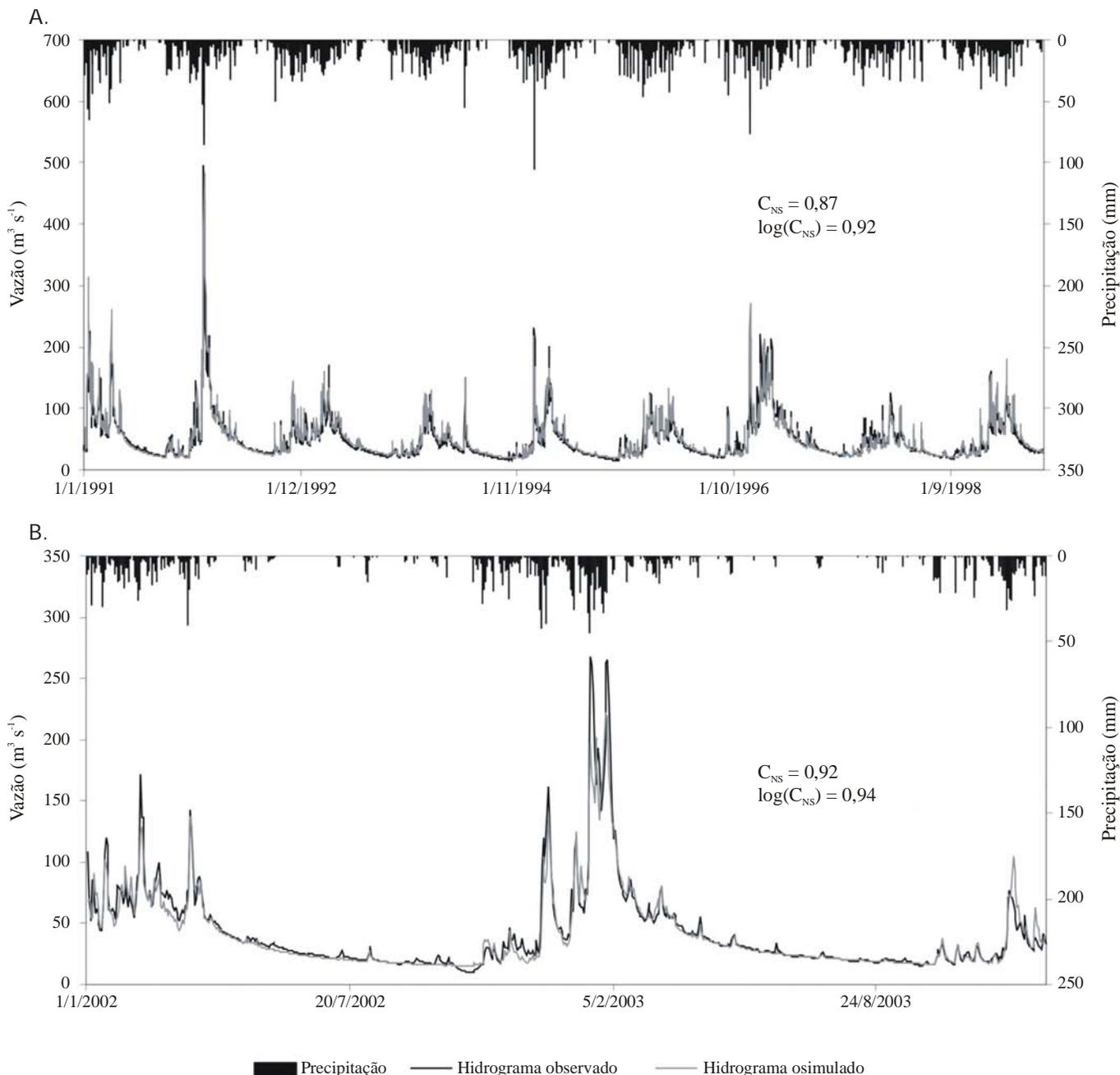


Figura 5. Hidrogramas observado e simulado para a bacia hidrográfica do Rio Aiuruoca, no período de calibração (A) e verificação (B), e hietograma de precipitação média diária na bacia

ente estatístico $\log(C_{NS})$, e indicando boa precisão na simulação de vazões mínimas.

Análise de algumas características hidrológicas simuladas

A comparação de vazões máximas, mínimas e de referência para outorga obtidos pela série simulada, frente aos valores observados, possibilita a análise de uma aplicação prática do modelo hidrológico como ferramenta na gestão dos recursos hídricos. A curva de permanência fornece a frequência com que determinada vazão é excedida, sendo frequentemente empregada em recursos hídricos na determinação de valores de referência, especialmente no contexto de vazões mínimas. Na Figura 6 se apresentam as curvas de per-

manência observada e simulada (A) e as vazões máximas (Q_{max}) e mínimas (Q_{min}) anuais, observadas e simuladas (B).

A análise visual do ajuste indica boa aderência entre as curvas observada e simulada; um valor de referência frequentemente extraído dessa curva é o $Q_{90\%}$, que representa a vazão superada ou igualada em 90% do tempo e para o qual foi simulado um valor de $20,93 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, muito próximo ao observado, que foi de $22 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Em termos de rendimento específico, a diferença entre valores observados e simulados para a Bacia do Rio Aiuruoca, foi de $0,5 \text{ L s}^{-1} \text{ km}^{-2}$, correspondendo a um erro de apenas 4,86%, comportamento que é um dos indicadores da capacidade de simulação do modelo como ferramenta potencial para a gestão dos recursos hí-

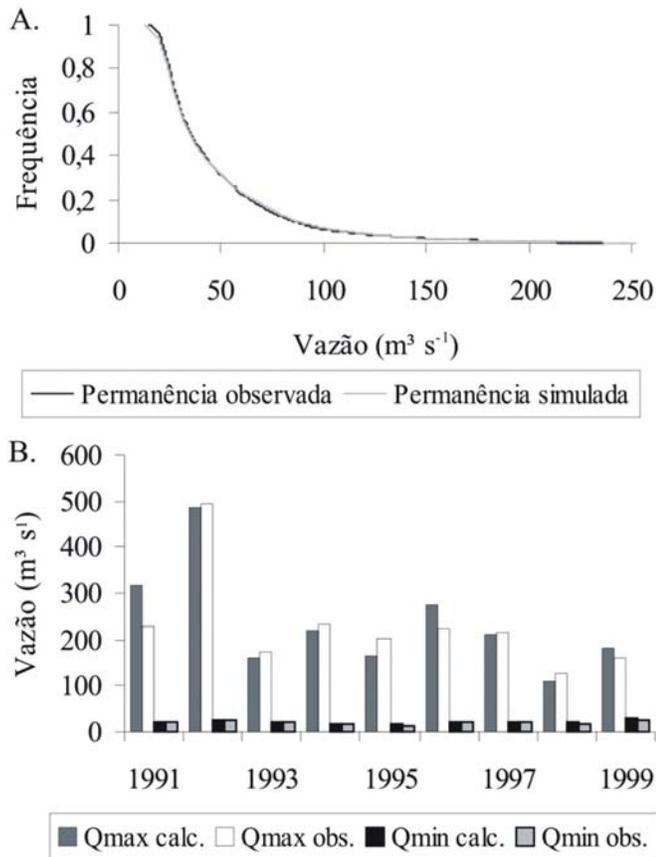


Figura 6. Curvas de permanência observada e simulada (A) e vazões máximas e mínimas observadas e simuladas (B) para a Bacia do Rio Aiuruoca

dricos.

A gestão dos recursos hídricos tem, na simulação hidrológica, uma ferramenta viável na previsão de vazões e, desta maneira, a validação do comportamento do modelo hidrológico frente às vazões máximas, empregadas no estudo de cheias, e mínimas, com múltiplas finalidades, é de fundamental importância, podendo-se checar a boa performance do modelo na simulação de valores extremos. Aliado a esta análise, o coeficiente de correlação entre vazões observadas e simuladas deixa claro o bom desempenho da simulação, em que se obtiveram coeficientes de 0,94 e 0,87 para as vazões máximas e mínimas, respectivamente.

É interessante destacar a cheia ocorrida em janeiro de 1992, a maior observada em mais de 70 anos de monitoramento na região Alto Rio Grande, em resposta a três dias chuvosos, que totalizaram uma lâmina de precipitação média na bacia de 211 mm, proporcionando uma vazão de $495 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ no Rio Aiuruoca, na seção de controle Fazenda Laranjeiras, o que equivale a cerca de 10 vezes a vazão média de longo termo. Esta vazão, simulada pelo modelo hidrológico, foi de $484,5 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, gerando um erro absoluto de apenas 2,12%.

As análises de precisão realizadas produziram resultados animadores com o modelo demonstrando potencial para aplicação como ferramenta preditiva do comportamento hidrológico da região, porém se reconhece que o mesmo precisa ser testado em outras bacias hidrográficas para que se possa concluir, de forma mais efetiva, sobre sua precisão.

CONCLUSÕES

1. Foi possível ajustar e aplicar satisfatoriamente o modelo hidrológico desenvolvido à bacia hidrográfica do Rio Aiuruoca, com precisão estatística superior à dos outros modelos aplicados em diferentes bacias hidrográficas, embora de porte semelhante e algumas com características climáticas globais semelhantes.

2. Os resultados da análise das principais variáveis hidrológicas extraídas do hidrograma atestaram a aplicabilidade do modelo como ferramenta de gestão e planejamento dos recursos hídricos, a princípio para a região Alto Rio Grande à montante da UHE de Camargos/CEMIG.

3. O modelo hidrológico pode ser aplicado na gestão dos recursos hídricos, contribuindo para o planejamento da agricultura irrigada na bacia hidrográfica do Rio Aiuruoca, simulando diferentes cenários de usos consuntivos, possibilitando o uso racional da água na bacia.

LITERATURA CITADA

- Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Raes, D.; Smith, M. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998. 300p. Irrigation and Drainage Paper, 56.
- Araújo, A. R. de. Solos da Bacia do Alto Rio Grande (MG): base para estudos hidrológicos e aptidão agrícola. Lavras: UFLA, 2006. 345p. Tese Doutorado
- Bitencourt, M. D.; Mesquita, H. N. de; Kuntschik, G.; Rocha, H. R.; Furley, P. A. Cerrado vegetation using optical and radar remote sensing: Two brazilian case studies. Canadian Journal of Remote Sensing, v.33, p.468-480, 2008.
- Bormann, H.; Breuer, L.; Gräff, T.; Huisman, J. A. Analyzing the effects of soil properties changes associated with land use changes on the simulated water balance: A comparison of three hydrological catchment models for scenario analysis. Ecological Modelling, v.209, p.29-40, 2007.
- Collischonn, W.; Allasia, D. G.; Silva, B. C.; Tucci, E. M. The MGB-IPH model for large-scale rainfall-runoff modeling. Hydrological Science Journal, v.52, n.3, p.878-895, 2007.
- Collischonn, W.; Tucci, C. E. M.; Haas, R.; Andreolli, I. Forecasting river Uruguay flow using rainfall forecasts from a regional weather-prediction model. Journal of Hydrology, v.305, p.87-98, 2005.
- Easton, Z. M.; Foka, D. R.; Walter, M. T.; Cowan, D. M.; Schneiderman, E. M.; Steenhuis, T. S. Re-conceptualizing the soil and water assessment tool (SWAT) model to predict runoff from variable source areas. Journal of Hydrology, v.348, p.279-291, 2008.
- Gomes, N. M. Variabilidade espacial de atributos físico-hídricos do solo da sub-bacia Hidrográfica do Ribeirão Marcela na Região do Alto Rio Grande, MG. Lavras: UFLA, 2005. 124p. Dissertação Mestrado
- Gottschalk, L.; Batchvarova, E.; Gryning, S. E.; Lindroth, A.; Melas, D.; Motovilov, Y. U. G.; Freeh, M.; Heikinheimo, M.; Samuelsson, P.; Grelle, A.; Persson, T. Scale aggregation: Comparison of flux estimates from NOPEX. Journal of Agricultural and Forest Meteorology, v.98-99, p.103-120, 1999.

- Green, C. H.; Tomer, M. D.; Di Luzio, M.; Arnold, J. G. Hydrologic evaluation of the Soil and Water Assessment Tool for a large tile-drained watershed in Iowa. *Transactions of the ASABE*, v.49, p.413-422, 2006.
- Junqueira Júnior, J. A. Escoamento de nascentes associado à variabilidade espacial de atributos físicos e uso do solo em uma bacia hidrográfica de cabeceira do Rio Grande – MG. Lavras: UFLA, 2006. 84p. Dissertação Mestrado
- Legates, D. R.; McCabe, G. J. Evaluating the use of “goodness of fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research*, v.26, n.1, p.69-86, 1999.
- Licciardello, F.; Zema, D. A.; Zimbone, S. M.; Bingner, R. L. Runoff and soil erosion evaluation by the AnnAGNPS model in a small Mediterranean Watershed. *Transactions of the ASABE*, v.50, n.5, p.1585-1593, 2007.
- Lima, J. E. F.W.; Silva, C. L.; Oliveira, C. A. S. Comparação da evapotranspiração real e simulada e observada em uma bacia hidrográfica em condições naturais de cerrado. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.5, n.1, p.33-41, 2001.
- Lima, W. P. Impacto ambiental do eucalipto. Piracicaba: EDUSP, 2.ed., 1996. 301p.
- Marsik, M.; Waylen, P. An application of the distributed hydrologic model CASC2D to a tropical montane watershed. *Journal of Hydrology*, v.330, p.481-495, 2006.
- Mello, C. R. de; Lima, J. M. de; Silva, A. M. da; Lopes, D. Abstração inicial da precipitação em microbacia hidrográfica com escoamento efêmero. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.7, n.3, p.494-500, 2003.
- Mishra, S. K.; Sahu, R. K.; Eldho, T. I.; Jain, M. K. An improved Ia-S relation incorporating antecedent moisture. *Water Resources Management*, v.20, n.3, p.643-660, 2006.
- Nash, J. E.; Sutcliffe, J. V. River flow forecasting through conceptual models Part I – A discussion of principles. *Journal of Hydrology*, v.10, n.2, p.282-290, 1970.
- Notter, B.; Macmillan, L.; Viriroli, D.; Weingartner, R.; Liniger, H. P. Impacts of environmental change on water resources in the Mt. Kenya Region. *Journal of Hydrology*, v.343, n.2, p.266-278, 2007.
- Pruski, F. F.; Rodrigues, L. N.; Silva, D. D. da. Modelo hidrológico para estimativa do escoamento superficial em áreas agrícolas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.5, n.2, p.301-307, 2001.
- Rawls, W. J.; Ahuja, L. R.; Brakensiek, D. L.; Shirmohammadi, A. Infiltration and soil water movement. In: Maidment, D. R. (org.). *Handbook of hydrology*. New York: McGraw-Hill Inc, 1993. p.1-51.
- Ribeiro Neto, A. Simulação hidrológica na Amazônia: Rio Madeira. Rio de Janeiro: UFRJ, 2006. 178p. Tese Doutorado
- Shuttleworth, W. J. Evaporation. In: Maidment, D. R. (org.). *Handbook of hydrology*. New York: McGraw-Hill Inc, 1993, Cap.4, p.1-53.
- Soares, J. V.; Almeida, A. C. Modeling the water balance and soil water fluxes in a fast growing Eucalyptus plantation in Brazil. *Journal of Hydrology*, v.253, p.130-147, 2001.
- Stackelberg, N. O. von; Chescheir, G. M.; Skaggs, R. W.; Amatya, D. M. Simulation of the hydrologic effects of afforestation in the Tacuarembó River Basin, Uruguay. *Transactions of the ASABE*, v.50, n.3, p.455-468, 2007.
- Thanapakpawin, P.; Richey, J.; Thomas, D.; Rodda, S.; Campbell, B.; Logsdon, M. Effects of land-use change on the hydrologic regime of the Mae Chaem river basin, NW Thailand. *Journal of Hydrology*, v.334, p.215-230, 2007.
- Troch, P. A.; Paniconi, C.; McLaughlin, D. Catchment-scale hydrological modeling and data assimilation. *Advances in Water Resources*, v.26, p.131-135, 2003.
- Zappa, M. Multiple-response verification of a distributed hydrological model at different spatial scales. Zurich: Swiss Federal Institute of Technology, 2002. 167p. Tese Doutorado
- Zhang, H. G.; Fu, S. H.; Fang, W. H.; Imura, H.; Zhang, X. C. Potential effects of climate change on runoff in the Yellow River Basin of China. *Transactions of the ASABE*, v.50, p.911-918, 2007.
- Zhou, M. C.; Ishidaira, H.; Hapuarachchi, J. M.; Kiem, A. S.; Takeuchi, K. Estimating potential evapotranspiration using Shuttleworth-Wallace model and NOAA-AVHRR NDVI data to feed a distributed hydrological model over the Mekong River basin. *Journal of Hydrology*, v.327, n.1, p.151-173, 2005.