



METODOLOGIA PARA ESTIMATIVA DA VAZÃO NATURAL EM PEQUENAS BACIAS HIDROGRÁFICAS COM BARRAGENS E CANAIS DE IRRIGAÇÃO SEM CONTROLE DE VAZÃO

Lineu Neiva Rodrigues^{1}; Marcelo Torres²*

Resumo – Milhares de pequenas barragens foram construídas no Brasil nos últimos anos. Essas barragens geralmente não possuem estrutura de controle de vazão efluente. Na região do Cerrado, a maior parte delas é utilizada para irrigação. Uma parte dessas barragens tem também canais que não possuem estrutura de controle de vazão. Ou seja, canais cuja vazão depende basicamente da carga hidráulica e do diâmetro do tubo que conecta a barragem ao canal. Para a gestão dos recursos hídricos, entretanto, é importante estimar a quantidade de água que é derivada da barragem para o canal, sendo essa informação importante também para os agricultores que utilizam essa água. O objetivo do presente trabalho foi desenvolver um procedimento metodológico para calcular a quantidade de água que é derivada para o canal e a vazão afluente ao reservatório, em bacias hidrográficas com barragens e canais sem estrutura de controle de vazão. O procedimento utiliza a relação cota-volume das barragens, a hidráulica de tubos e canais abertos e dados de vazão observada à jusante da barragem. O procedimento foi modelado e aplicado na estimativa das vazões dos canais e da naturalização da vazão do rio da bacia hidrográfica do Buriti Vermelho.

Palavras-Chave – hidrologia, irrigação, recursos hídricos.

METHODOLOGY TO NATURALIZED DISCHARGE IN SMALL WATERSHEDS WITH RESERVOIRS AND IRRIGATION CHANNELS WITHOUT DISCHARGE CONTROL

Abstract – Thousands of small reservoirs were built in the last few decades in Brazil. In general, these reservoirs do not have discharge control structure and are used for irrigation purposes. Some of these reservoirs have irrigation channels also without discharge control structure. It means channels in which the discharge depends basically on the hydraulic head and diameter of the pipe that connects the dam to the channel. To water management purposes, it is important to know the discharge that goes from the dam to the channel. This information is also important to farmers that depend on this water. The objective of this paper was therefore to develop a methodology to estimate the amount of water diverted to the channel and to calculate natural discharge in small watersheds with reservoirs and irrigation channels without discharge controls. The procedure uses the volume-depth relationships of the reservoirs, the hydraulic of pipes and open channels and the observed discharge. The procedure was modeled and applied to estimate channels discharge of the Buriti Vermelho watershed.

Keywords – hydrology, irrigation, water resources.

INTRODUÇÃO

¹ Pesquisador, Embrapa Cerrados, lineu.rodrigues@embrapa.br.

² Professor, Universidade de Brasília, motorres@hotmail.com.br

* Autor Correspondente.



Pequenas barragens são infraestruturas fundamentais para a manutenção da economia em várias regiões do Brasil. Nos últimos anos, milhares de pequenas barragens foram construídas no país. Segundo Rodrigues et. al. (2007), apenas na bacia do rio Preto, afluente do rio Paracatu, com uma área de drenagem de 10.500 km², existem mais de 252 barragens com área do espelho d'água variando entre 1 e 413 ha. Esses reservatórios, principalmente quando avaliados em conjunto, podem impactar significativamente o ambiente local, principalmente a sua hidrologia e ecologia.

Essas barragens são utilizadas basicamente para fins de irrigação e dessedentação animal. Uma parte delas é utilizada como fonte de água para irrigação de pequenas comunidades rurais, sendo a água transportada até a propriedade por meio de canais. Uma característica do sistema hídrico pequena barragem-canal é que eles não são controlados. Isto é, não existem estruturas hidráulicas de controle de vazão no vertedor da barragem e nem da quantidade de água que é derivada para o canal.

O não conhecimento da quantidade de água derivada da barragem para os canais de irrigação trás uma série de inconvenientes. Primeiramente dificulta o conhecimento da vazão natural, que é informação fundamental na identificação da real capacidade hídrica da bacia. É também um complicador para os trabalhos de regionalização de vazões e de modelagem hidrológica. Por fim, trás uma dificuldade de outorga da água nos canais e uma incerteza hídrica aos produtores, potencializando os conflitos.

O Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), bem como outras instituições envolvidas no planejamento e gestão de recursos hídricos, têm dedicado grande atenção à reconstituição de séries de vazões naturais. Existem muito poucos estudos na literatura sobre naturalização de vazões, que consiste basicamente em adicionar à vazão observada as vazões retiradas. (Oliveira et. al., 2008).

Existem vários modelos numéricos para estimar a vazão afluente aos reservatórios (Labadie, 2004). Algumas abordagens consideram as regras de operação da barragem e as incertezas associadas aos processos (Mediero et. al., 2015). Existe também uma variedade de outros modelos para estimar a vazão escoada em canais, como, por exemplo, o SINWAT (Querner, 1986).

Há, entretanto, uma carência muito grande de metodologias que possibilitem estimar a vazão derivada da barragem para canais não operados e naturalização de vazões nessas condições específicas.

Neste contexto, o objetivo do presente trabalho foi desenvolver uma metodologia para estimar vazão escoada para canais em sistemas hídricos formados por pequenas barragens e canais sem estrutura de controle de vazão.

MÉTODOS

Metodologia

A metodologia desenvolvida utiliza dados de vazão observada de uma estação linimétrica localizada à jusante da barragem (Figura 1).

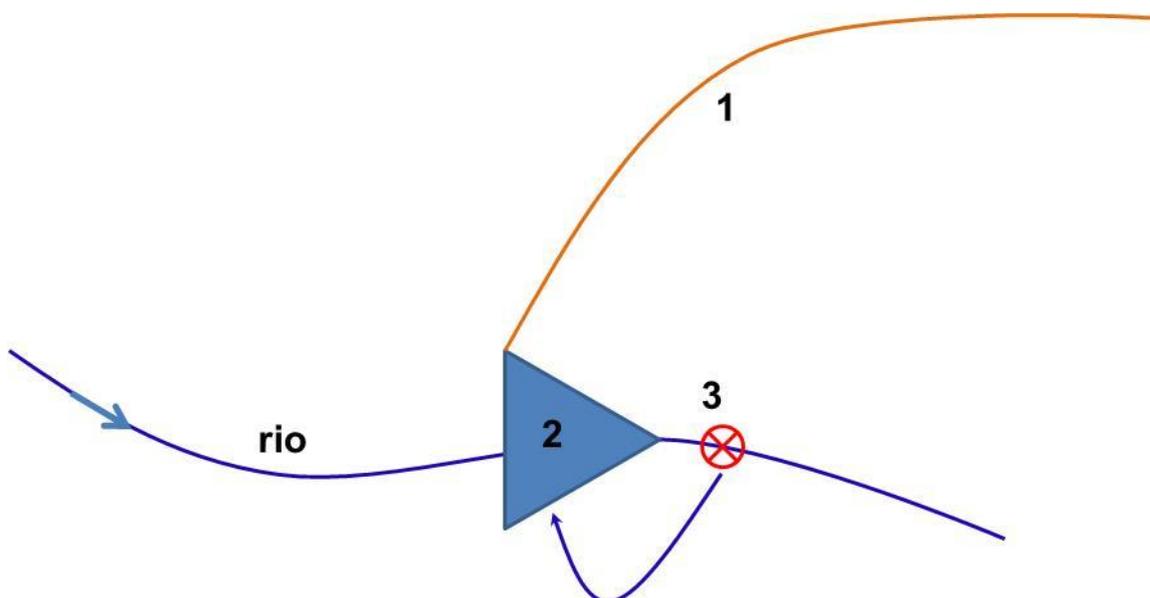


Figura 1 – Esquema representativo do sistema hídrico barragem-canal com estação linimétrica localizada a jusante da barragem. 1. Canal; 2. Barragem; 3. Estação linimétrica.

Tanto o canal como o vertedor da barragem não possuem estruturas de controle de vazão. Desta forma, a vazão que é derivada da barragem para o canal é função da variação da carga hidráulica e do diâmetro do tubo que faz a ligação da barragem com o canal.

Sendo assim, para simular a vazão derivada da barragem para o canal é necessário conhecer a dinâmica da variação do nível de água dentro da barragem. O problema que surge é que não se conhece a priori a vazão afluyente ao reservatório. Para resolver esse problema é feito um processo iterativo de cálculo da vazão afluyente, em que, na primeira vez, considera-se que a vazão afluyente ao reservatório é a vazão observada à jusante.

Partindo-se desta pressuposição, calcula-se o volume total de água armazenada na barragem, considerando essa vazão afluyente, equação 1

$$Vol_t = Vol_{in} + 0,3 Q_{af} \quad (1)$$

em que

$$\begin{aligned} Vol_t &= \text{volume total de água armazenada na barragem, m}^3 \\ Vol_{ini} &= \text{volume inicial, m}^3 \\ Q_{af} &= \text{vazão afluyente média, L s}^{-1} \end{aligned}$$

sendo,

$$Vol_{ini} = k_1 ProfMax^{k_2} \quad (2)$$

em que

$$\begin{aligned} Vol_{ini} &= \text{volume inicial de água armazenada na barragem, m}^3 \\ ProfMax &= \text{profundidade máxima, m} \\ K_1 \text{ e } k_2 &= \text{Coeficientes} \end{aligned}$$



Em seguida, calcula-se a variação da altura de água na barragem provocado pela vazão afluente, equação 3.

$$\Delta h = \left(\frac{Vol_t}{k_1} \right)^{\frac{1}{k_2}} - ProfMax \quad (3)$$

A vazão derivada da barragem para o canal (Q_{B-C}), m^3 , é calculada em função da área interna, da velocidade de escoamento e da variação da altura de água sobre o tubo (Figura 2), sendo calculada pela equação 4

$$Q_{B-C} = A_t \sqrt{\frac{2 g \Delta h}{1,5+f \frac{L}{D}}} \quad (4)$$

em que

- A_t = área interna do tubo, m^2
- g = aceleração devido à gravidade, $m s^{-2}$
- f = fator de atrito da fórmula de Darcy-Weisbach, adimensional
- L = comprimento do tubo, m
- D = diâmetro interno do tubo, m

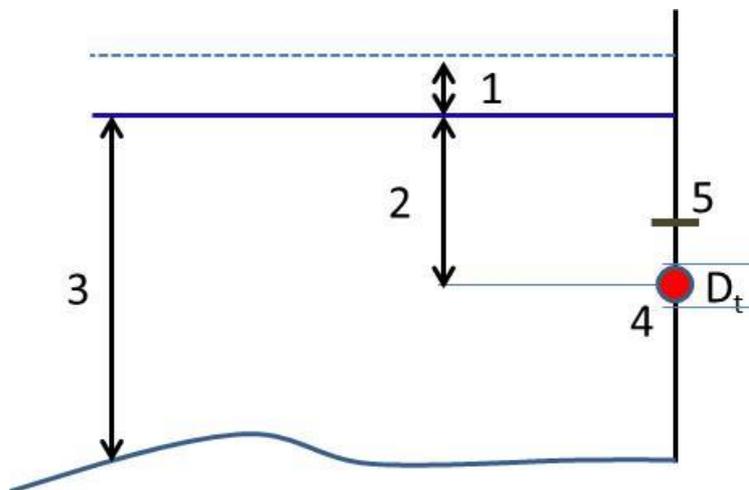


Figura 2 – Esquema representativo das variáveis que interferem na variação da vazão derivada para o canal. 1- variação da altura de água na barragem, devido a vazão afluente; 2 – profundidade do tubo que conduz água da barragem para o canal; 3 – profundidade máxima da barragem; 4 – tubo; 5 – extravasador.

O procedimento de cálculo foi feito de maneira iterativa, onde na primeira vez a vazão do canal é considerada zero. Na sequência, ela é calculada com base na vazão afluente, que na primeira vez é considerada igual a vazão observada à jusante da barragem. Na segunda rodada, a vazão afluente é calculada pela equação 5 e a vazão derivada para o canal é recalculada. Esse procedimento é repetido até que seja atingida a precisão estabelecida.



$$Q_{\text{afl}(i)} = Q_{\text{afl}(i-1)} + Q_{C2} \quad (5)$$

Se houver outra barragem com canal a montante, o passo seguinte consiste em calcular a vazão afluente a essa nova barragem e a vazão do canal. O procedimento é feito de maneira similar ao descrito anteriormente, com a diferença de que a vazão afluente a esse novo reservatório é calculada pela equação

$$Q_{\text{aflB}(i)} = Q_{\text{aflB}(i-1)} \frac{A_{\text{contR}(i)}}{A_{\text{contR}(i-1)}} \quad (6)$$

Avaliação da metodologia

A metodologia foi aplicada para estimar a vazão de dois canais em duas barragens localizadas na bacia hidrográfica do Buriti Vermelho. Para fins de explicação, a barragem à montante foi denominada de B1 e seu canal de C1 e a localizada a jusante de B2 e seu canal de C2, Figura 3.

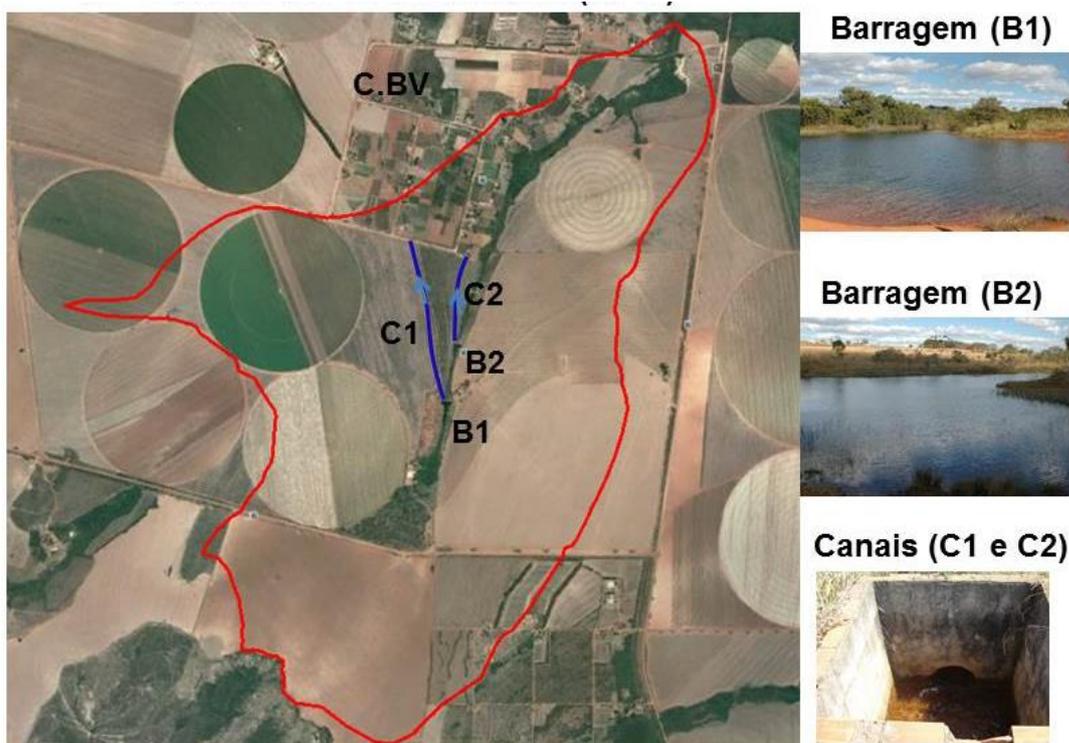


Figura 3 – Bacia hidrográfica do rio Buriti Vermelho, destacando as barragens e canais.

A simulação foi realizada por um período de um ano. Para efeitos de validação do modelo, foram realizadas medidas da altura da água no canal mensais e comparadas com a altura simulada pelo modelo. A qualidade dos resultados foi avaliada por meio do R^2 e a eficiência do modelo por meio do coeficiente de Nash (Nash and Sutcliffe, 1970).

RESULTADO E DISCUSSÃO

Para testar a metodologia proposta foi desenvolvido software denominado NaturalFlow. O programa computacional foi desenvolvido em linguagem Object Pascal, com o compilador Delphi



XE5; trata-se de um programa interativo que permite ao usuário escolher diversas opções de configuração do sistema, Figura 4. Antes de executar o programa, o usuário necessita criar um arquivo tipo texto contendo dados da vazão observada. Outros dados de entrada são: (i) diâmetro do tubo que transporta água da barragem para o canal; (ii) comprimento do tubo; (iii) altura da água acima do tubo; profundidade máxima da barragem; coeficientes k_1 e k_2 da barragem.

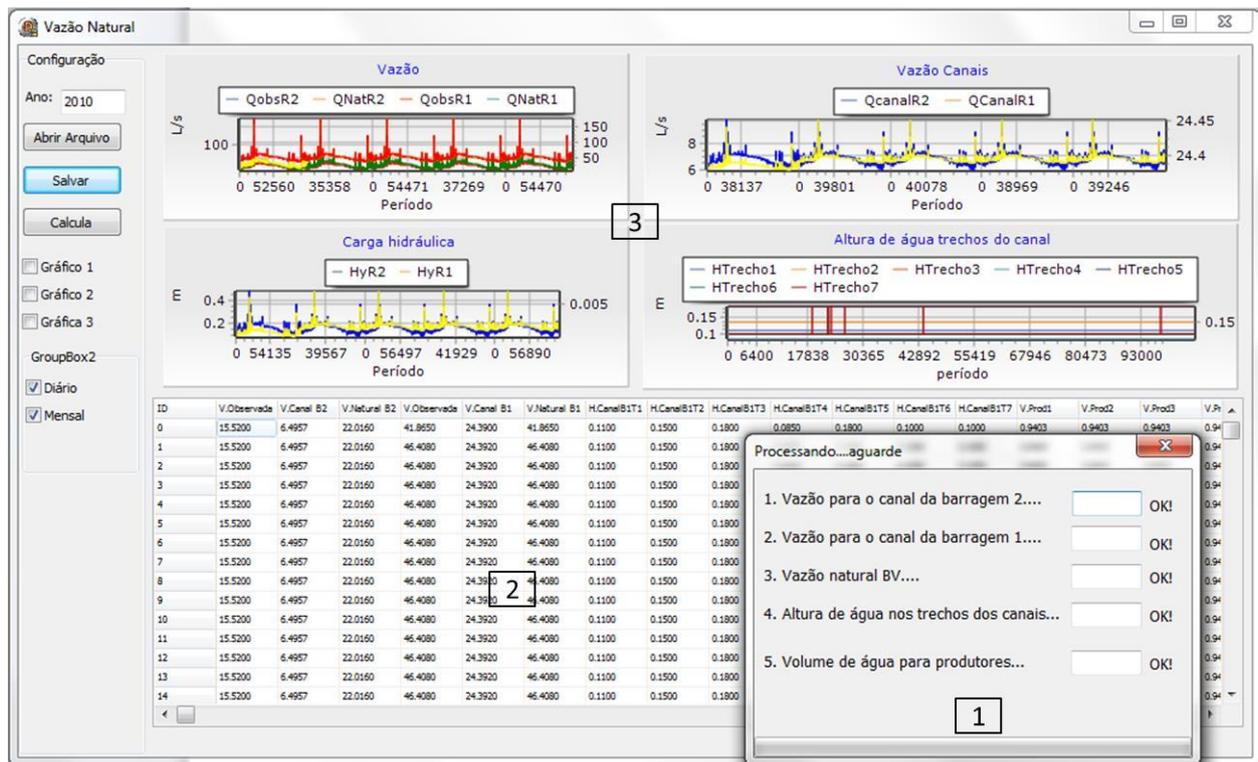


Figura 4 – Tela representativa do software NaturalFlow. 1. Tela indicando a andamento da simulação; 2. Grid apresentando os resultados numéricos das simulações; 3. Componentes gráficos visuais.

Foram coletados em campo os dados de entrada do modelo para realização da simulação (Quadro 1). Além desses dados, foram utilizados dados de vazão observada à jusante de B2, em intervalos de tempo de cinco minutos.

Quadro 1 – Dados de entrada do modelo utilizados na simulação

	k_1	k_2	ProfMax (m)	AcontR (ha)	L (m)	D (m)	$h_{inicial}$ (m)
B1	316,73	2,668	4,05	340,8	5,00	0,1	1,093
B2	166,6	2,2151	3,40	429,4	4,94	0,075	0,163

Na Figura 5 apresentam-se os valores de vazões simuladas para o canal C2 e de vazão afluente ao reservatório da barragem B2. Como era de se esperar observa-se um comportamento semelhante, uma vez que a vazão no canal é função da vazão afluente ao reservatório. A vazão mínima observada no canal foi de $6,02 \text{ L s}^{-1}$, a máxima foi de $8,14 \text{ L s}^{-1}$ e a média de $6,78 \text{ L s}^{-1}$; já a vazão afluente teve valores variando de $13,98 \text{ L s}^{-1}$ a $79,95 \text{ L s}^{-1}$, com média de $28,81 \text{ L s}^{-1}$. A diferença média entre as duas vazões foi $22,04 \text{ L s}^{-1}$.



XXI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

Segurança Hídrica e Desenvolvimento Sustentável:
desafios do conhecimento e da gestão

De 22 a 27 de novembro de 2015, Brasília – DF

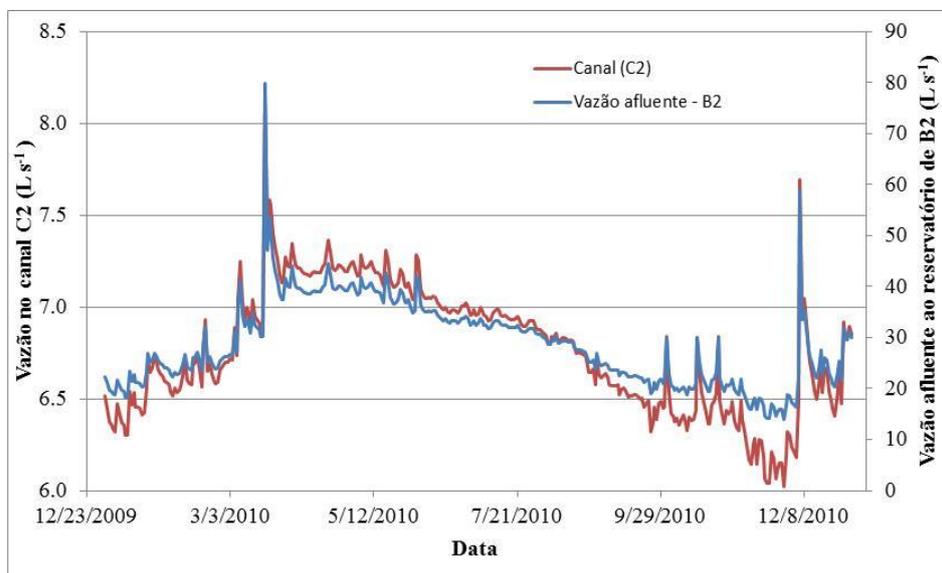


Figura 5 - Valores de vazões simuladas para o canal C2 e de vazão afluyente ao reservatório da barragem B2.

A Figura 6 mostra valores da altura da água no canal C2 e valores da altura de água medida mensalmente. Observa-se nessa figura que o modelo simulou adequadamente a altura de água no canal, sendo esta um indicativo da vazão escoada.

Uma dificuldade que se teve foi ter precisão na medida da altura de água no canal, uma vez que ela era feita com régua e a turbulência dificultava ter exatidão na medida. Para reduzir esse erro faziam-se cinco medidas e utilizava-se a média. De maneira geral observa-se um ajuste dos dados simulados pelo modelo com os medidos, com R2 de 0,90 e coeficiente de Nash-Sutcliffe de 87%

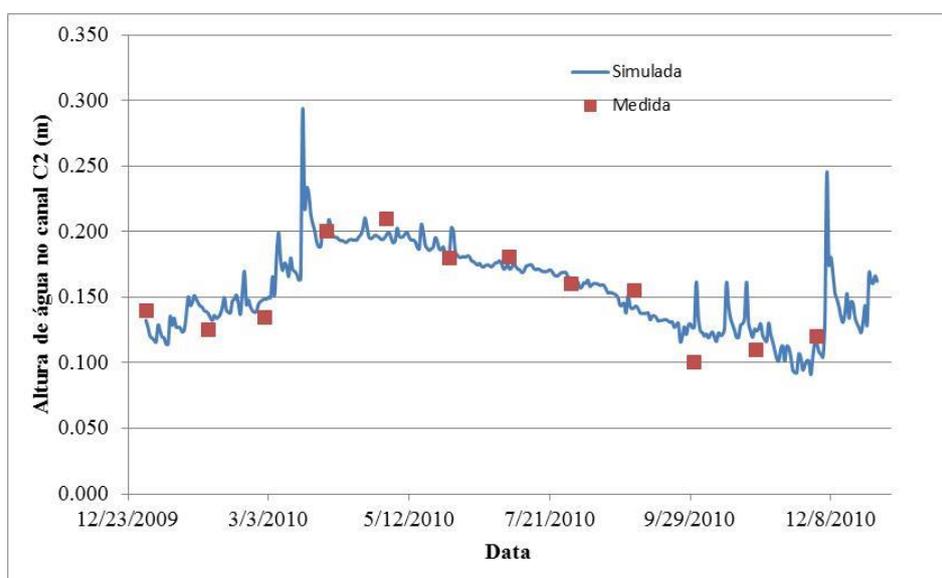


Figura 6 - Valores de altura de água no canal simulada e medida.



XXI SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

Segurança Hídrica e Desenvolvimento Sustentável:
desafios do conhecimento e da gestão

De 22 a 27 de novembro de 2015, Brasília – DF

CONCLUSÃO

A metodologia desenvolvida foi aplicada na estimativa da vazão dos canais e afluente do reservatório B2 da bacia hidrográfica do Buriti Vermelho. Com base nos resultados das simulações, pode-se constatar que o modelo simulou adequadamente a altura da água no canal C2, com coeficiente de Nash-Sutcliffe igual a 87%.

A metodologia mostrou-se adequada para estimativa de vazões derivadas para canais e afluentes em barragens de bacias hidrográficas que apresentam a configuração hídrica barragem-canal não operados.

AGRADECIMENTOS

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro ao projeto de pesquisa.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS

LABADIE, J. W. Optimal operation of multireservoir systems: state-of-the-art review. *J. Water Resour. Plann. Manage.* 130(2), 93–111, 2004.

MEDIERO, L.; GARROTE, L.; MARTÍN-CARRASCO, F. A probabilistic model to support reservoir operation decisions during flash floods, *Hydrological Sciences Journal*, 52:3, 523-537, 2007. DOI: 10.1623/hysj.52.3.523

NASH, J.E; SUTTCLIFFE, J.V. River flow forecasting through conceptual models. 1. A discussion of principles. *J Hydrol* 10:282–290, 1970.

OLIVEIRA, F.A.; MELLO, E. L.; FIGUEREDO, J. ;PRUSKI, F. F.;RODRIGUEZ, Renata Del Giudice. Impacto do uso de vazões naturais em estudos hidrológicos. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 13, p. 191-197, 2008.

QUERNER, E.P., 1986. An integrated surge and groundwater flow for the design and operation of drainage systems. *Int. Conf. on Hydraul. Design in Water Res. Eng. Land Drainage*, Shouthampton, 101-108.

RODRIGUES, L.N, SANO, E.E; AZEVEDO, J.A; SILVA, E.M. Distribuição espacial e área máxima do espelho d'água de pequenas barragens de terra na Bacia do Rio Preto. *Espaço e Geografia (UnB)* 10:101–122, 2007