

REGIONALIZAÇÃO DE CURVAS DE REGULARIZAÇÃO PARA DIFERENTES GARANTIAS: rio Apodí-Mossoró/RN

Joana Darc Freire de Medeiros¹; Laudizio da Silva Diniz¹ & Carlos Eduardo M. Tucci¹

RESUMO

A regionalização da curva de regularização é utilizada para estimativa da capacidade de regularização em locais com dados escassos. Nesta regionalização não são consideradas as perdas por evaporação do reservatório devido a não-linearidade da equação da continuidade. A evaporação é introduzida como demanda de forma empírica, o que pode produzir erro em regiões como o semi-árido onde a taxa de evaporação é muita elevada.

Neste artigo foi analisado o conceito de diferentes garantias associadas ao atendimento da demanda, na regionalização da curva de regularização e a avaliação da metodologia simplificada apresentada por Tucci (1993), para considerar a evaporação na extrapolação da regionalização. Nesta análise foi utilizada a bacia hidrográfica do rio Apodí, no Rio Grande do Norte.

Com base na análise foi apresentada uma metodologia alternativa para considerar a evaporação, de forma a obter resultados mais próximos dos valores obtidos por simulação através de balanço hídrico. Os resultados obtidos mostraram que: (a) o conceito de garantia pode ser associado às curvas regionais de regularização com aumento na vazão regularizada; (b) a metodologia simplificada apresentada por Tucci (1993) tende a superestimar as perdas por evaporação se comparado com o uso da simulação, com redução na vazão regularizada, em média, de 17%; (c) a metodologia proposta neste trabalho estima as perdas por evaporação com erro na ordem de 2%, o que pode ser considerado satisfatório. No entanto, o método proposto necessita ser testado em outras bacias antes de ser utilizado.

ABSTRACT

The regionalization of the reservoir capacity-yield curve has great importance in the planning and management of the water resources. This importance becomes more significant in semi-arid

¹ Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH-UFRGS) Av. Bento Gonçalves, 9500 – Agronomia CEP 91.510-970 Porto Alegre/RS - Caixa Postal 15029 Fone: (51) 3316 6326 Fax (51) 3316 7509 e-mail: joana@ppgiph.ufrgs.br, laudiziod@bol.com.br

areas, where the intermittent of the streams does with that the water availability of the area is strictly related with the storage of water in reservoirs. Usually, in the regionalization of the reservoir capacity-yield curves, the losses by evaporation are not considered, what can be reasonable in humid or semi-humid climate regions, but that can represent a significant mistake when used in arid or semi-arid areas, where the evaporation rate is a lot of high. The present work has for objective to introduce the concept of different warranties associated to the attendance of the demand in the regionalization of the reservoir capacity-yield curve and to evaluate the simplified methodology presented by Tucci (1993) to consider the evaporation in the extrapolação of the same, using as example the Apodi basin, in the state of Rio Grande do Norte. As alternative, a new method to consider the evaporation is suggested by providing closer results of the values obtained by simulation through water balance. The results showed that the warranty concept can be associated to the reservoir capacity-yield curve with increase in the regularized flow; the simplified methodology presented by Tucci (1993) it tends to overestimate the losses for evaporation, with reduction in the regularized flow in 17% in the average; and that the methodology proposal in this work esteem the losses for evaporation with mistake in the order of the 2%, what can be considered satisfactory.

Palavras Chave: regionalização, curva de regularização, evaporação

INTRODUÇÃO

O conhecimento da disponibilidade hídrica de uma bacia é essencial no planejamento e dimensionamento de projetos relacionados com o aproveitamento e/ou preservação dos recursos hídricos. No entanto, na maioria das bacias do Brasil existe uma grande deficiência de dados de vazão para subsidiar estes estudos, fazendo com que o hidrólogo busque alternativas metodológicas. Neste sentido, as técnicas de regionalização têm sido usadas para permitir aos hidrólogos utilizar dados medidos em um determinado lugar para aplicações em outros locais onde as medições não foram efetuadas ou as que existem são de má qualidade.

É importante lembrar que nenhum modelo, técnica matemática ou estatística é capaz de criar informações, portanto, a existência de uma rede de observação é imprescindível para o conhecimento do comportamento dos processos hidrológicos. Isto não significa, entretanto, que a regionalização não possa ser usada. Ao contrário, ela é necessária e muito importante, desde que devidamente empregada. Evidentemente, que os resultados decorrentes de uma regionalização

nunca irá substituir a observação feita em campo e pode se distanciar dos valores ideais, mas as decisões tomadas com base neste tipo de estudo são mais consistentes do que aquelas obtidas com base em extrapolações empíricas ou em sentimentos individuais (Strobel, 1987).

Dentre as variáveis, parâmetros ou funções passíveis de serem regionalizados, a curva de regularização se apresenta como uma de grande importância, principalmente em regiões semi-áridas, com déficit hídrico na maior parte do ano e, conseqüentemente, intermitência na rede hidrográfica. Vieira (1999) conceituou disponibilidade de água como sendo a quantidade efetivamente disponível de forma duradoura e permanente. Neste sentido, a disponibilidade natural de água em rios intermitentes é nula e são os reservatórios de acumulação que proporcionam a regularização interanual dos deflúvios naturais. Por outro lado, este mesmo autor verificou que o rendimento dos açudes na região semi-árida é muito baixo (inferior a 40%), corroborando a tese que a natureza cobra um alto “preço” pela acumulação de água em reservatórios de superfície. Portanto, a determinação do volume do reservatório que proporcione a melhor eficiência e satisfaça uma determinada demanda é, sem dúvida, de grande importância para o gerenciamento das águas em região semi-árida.

A curva de regularização, que relaciona a vazão garantida, com uma determinada probabilidade, e o volume de regularização necessário para garantir a vazão, é de grande importância no dimensionamento do açude.

A regionalização da curva de regularização pode ser utilizada como um procedimento alternativo para obter esta curva em bacias que não possuem dados históricos de vazão. Existem três metodologias básicas para obtenção da curva de regularização: curva de permanência; curva de probabilidade de vazões mínimas e simulação. As curvas de regularização, obtidas pelo método de simulação, não consideram as perdas por evaporação do reservatório, o que pode ser razoável em regiões de clima úmido ou semi-úmido, mas que pode representar um erro significativo quando utilizado em regiões áridas ou semi-áridas, onde a taxa de evaporação é muita elevada.

Tucci (1993) apresenta uma metodologia simplificada para considerar as perdas por evaporação na obtenção da curva de regularização de uma bacia. Este artigo tem por objetivo introduzir o conceito de diferentes garantias associadas ao atendimento da demanda na regionalização da curva de regularização e avaliar a metodologia simplificada apresentada por Tucci (1993) para considerar a evaporação na extrapolação da mesma, utilizando como estudo de caso a bacia do rio Apodi, no Rio Grande do Norte. Adicionalmente foi apresentado um novo método para considerar a evaporação, que proporciona resultados mais próximos dos valores obtidos por simulação através de balanço hídrico.

CURVA DE REGULARIZAÇÃO

A potencialidade hídrica de uma bacia hidrográfica em termos do seu aproveitamento através de reservatórios de acumulação está delimitada pela sua vazão média de longo período. Este potencial, nunca é totalmente transformado em disponibilidade para uso efetivo, mas apenas uma parcela que pode alcançar um máximo de cerca de 70%. Em regiões semi-áridas a situação é agravada pela existência de altas taxas de evaporação que transforma a água dos rios e reservatórios em vapor antes que essa seja captada pelos centros de consumo. Devido a isto, a eficiência dos reservatórios fluviais em regularizar vazão é condicionada, em parte, ao quanto da água armazenada ficará exposta à atmosfera. Muitas vezes, é preferível construir, do ponto de vistas hidrológico, apenas um reservatório de grande porte em vez de vários, mesmo que estes apresentem maior capacidade de armazenamento total. Uma vez que, a inclusão de mais um reservatório em um sistema existente pode significar perda na vazão regularizável total.

A curva de regularização é a função que relaciona a capacidade de armazenamento S de um reservatório com a vazão regularizável Q_{reg} , estando esta associada a uma dada garantia de atendimento p (equação 1).

$$S = f(Q_{reg}, p) \quad (1)$$

Para determinação do volume S pode-se utilizar a equação da continuidade do reservatório e obter a vazão por iteração. A equação da continuidade fica

$$VA - VE = \Delta S \quad (2)$$

sendo: VA = volume total afluyente (= Q); VE = volume total efluente (= Q_{reg}), incluindo a evaporação; ΔS = variação do volume no intervalo de tempo considerado (= $S_{t+1} - S_t$)

Em termos mais específicos a equação 2 assume a seguinte forma:

$$S_{t+1} = S_t + (Q_t - q_t) * \Delta t + (P_t - E_t) * A \quad (3)$$

onde: S_{t+1} = armazenamento no tempo $t+1$; S_t = armazenamento no tempo t ; Q_t = vazão total de entrada; P_t = precipitação direta no espelho d'água no intervalo t ; E_t = evaporação no período t ; A = área média do reservatório; q_t = vazão regularizada.

BACIA DO RIO APODI-MOSSORÓ

A bacia do rio Apodi-Mossoró nasce na fronteira do estado com a Paraíba, corta toda o setor oeste do estado do Rio Grande do Norte, na direção sul-norte, até desembocar no Oceano Atlântico a altura do município de Grossos. Ocupa uma superfície de 14.276 km², correspondendo a cerca de 26,8% do território estadual (Figura 1).

O clima predominante é do tipo **BSh'**, da classificação de Köppen, caracterizado por um clima muito quente e semi-árido, com a estação chuvosa concentrada em quatro meses (fevereiro a maio). No extremo sudeste da bacia, correspondendo às suas nascentes, ocorre o clima do tipo **Aw'** (clima tropical chuvoso). Na maior parte da bacia, as chuvas anuais médias de longo período situam-se em torno de 700 mm, havendo uma pequena área, na região serrana, onde as precipitações médias são superiores a 1000 mm.

Do ponto de vista geológico, grande parte da bacia está assentada sobre o embasamento cristalino, na feição geomorfológica Depressão Sertaneja; a parte baixa assenta-se sobre o embasamento sedimentar, com a presença de um extenso platô de formação Cárstica, constituído pelo pacote sedimentar clástico da Formação Açú, chamado popularmente por Chapada do Apodi.

O Plano Estadual de Recursos Hídricos cadastrou cerca de 618 açudes na bacia, totalizando um volume de acumulação de 469.714.600 m³, no entanto, somente dez açudes têm capacidade de acumulação superior a 10.000.000 m³.



Figura 1: Localização da bacia Apodi-Mossoró (a bacia escoar para o Oceano Atlântico).

Dados hidrológicos

Os dados pluviométricos utilizados no trabalho são provenientes dos Bancos de Dados Hidrometeorológicos da SUDENE e da Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte – EMPARN. Existem instalados na bacia 32 postos pluviométricos com série histórica superior a 10 anos de dados. Com relação aos dados de vazão, o Inventário de Postos Fluviométricos da ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica) contabiliza um total de 16 postos fluviométricos na bacia, sendo que muitos deles encontram-se desativados e/ou possuem uma série histórica muito curta. A seleção dos postos em operação e com série de vazão de no mínimo cinco anos, reduziu os postos

disponíveis a apenas seis unidades, conforme Tabela 1. A evapotranspiração média mensal utilizada é aquela obtida por Bristot (1999) para cada um dos postos pluviométricos utilizados.

Tabela 1: Postos fluviométricos em operação na bacia do rio Apodi-Mossoró

Codigo	Nome	Lat.	Long.	Alt.	Area Dren	Inicio
37030000	PAU DOS FERROS	-6.111	-38.201	175	2050	fev-63
37080000	PEDRA DE ABELHAS	-5.593	-37.684	70	6480	nov-10
37084000	GOV DIX-SEPT ROSADO	-5.450	-37.515	6.4	7129	set-86
37090000	MOSSORO	-5.219	-37.362	0	9450	set-86
37150000	AUGUSTO SEVERO	-5.867	-37.315	0	1083	set-86
37185000	UPANEMA	-5.644	-37.255	45	1410	jan-75

REGIONALIZAÇÃO DA CURVA DE REGULARIZAÇÃO

A equação de regularização $S = f(Q_{reg}, p)$ adimensionalizada em relação à vazão média da bacia, pode ser escrita da seguinte forma:

$$S_a = f(\beta, p) \quad (4)$$

onde: $\beta = Q_{reg}/Q_{med}$, e S_a é a capacidade máxima adimensional do açude, dado por:

$$S_a = S/Q_{med} \quad (5)$$

Com base nos dados de cada reservatório se determina pares de pontos (S, Q_{reg}) , com os quais se pode ajustar uma curva do tipo:

$$S_a = a \beta^b \quad (6)$$

onde: a e b são constantes obtidas por análise de regressão.

A regionalização da equação 6 pode ser feita, segundo Tucci (2000), de duas maneiras: (a) estabelecer a regressão entre as constantes a e b da equação com base em características físicas das bacias estudadas; (b) ajuste de uma curva média com postos de tendência semelhante.

Domokos e Gilyén-Hofer (1990) e Tucci e Goldenfum (1991) utilizaram o primeiro método sem sucesso, tentando regionalizar os parâmetros com os coeficientes de variação das bacias. O segundo método foi utilizado por Tucci (1991) e, depois, por Obregon et al. (1999) usando séries estendidas através de um modelo chuva-vazão mensal. A delimitação de regiões homogêneas em termos de regularização foi feita por agrupamento das curvas de regularização segundo as suas tendências, permitindo obter-se curvas regionais de regularização, válidas para o intervalo de vazão adimensional onde a curva pode ser usada. Sua aplicação em bacias que não tenham dados pode ser feita após regionalizar a vazão média Q_{med} em função das características físicas das bacias hidrográficas e combina-las com as equações 5 e 6.

Curvas individuais de Regularização

No caso de regionalização, como não se conhece a topobatimetria do reservatório, fica difícil estimar a área do reservatório, desta forma, num primeiro momento despreza-se a precipitação e a evaporação no reservatório e a equação 3 fica:

$$S_{t+1} = S_t + (Q_t - q) * \Delta t \quad (7)$$

Esta equação pode ser adimensionalizada pela vazão média de longo período e pelo intervalo de tempo, e fica como:

$$\frac{S_{t+1}}{Q_m * \Delta t} = \frac{S_t}{Q_m * \Delta t} + \frac{Q_t}{Q_m} - \frac{q}{Q_m} \quad (8)$$

A determinação da curva de regularização é feita em dois momentos: no primeiro, para cada demanda determina-se um volume armazenado que atenda 100% do tempo; no segundo, para cada volume armazenado encontra-se uma vazão que seja atendida com uma garantia p. Neste trabalho serão adotadas as garantias de 90%, 95% e 100%, uma vez que dificilmente se trabalha com garantias menores.

Para a determinação das curvas de regularização adimensional de cada posto fluviométrico, além de utilizar o conjunto de programas desenvolvido por Tucci (2000), desenvolveu-se outro, denominado Regula-Garantia, para considerar garantias diferentes de 100%, conforme Figura 2. Neste programa, os volumes armazenados determinados no programa REGULA2 são usados para simular demandas que serão atendidas com garantias inferiores.

O programa TRANS lê o arquivo de vazões mensais e organiza os dados no formato de entrada do programa PREENCHE, o qual preenche as falhas da série utilizando uma equação de regressão com o posto fluviométrico que apresentar a melhor correlação com o posto em estudo. O programa REGULA2 lê os dados já preenchidos pelo programa anterior e gera a curva adimensional de regularização para 100% de garantia. Os dados de volumes armazenados servem de partida para o programa REGULA-GARANTIA que determina outras curvas de regularização com garantias inferiores.

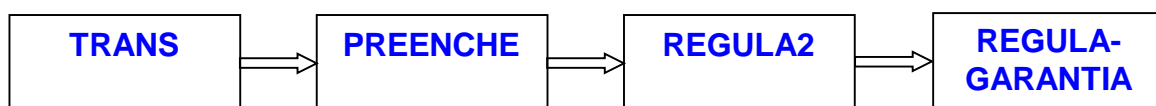


Figura 2: Fluxograma de rotinas utilizadas no trabalho

As curvas de regularização das diferentes probabilidades apresentam comportamento semelhante. Na figura 3 é apresentada a curva para 95% de garantia. É interessante observar que a

diminuição da garantia resulta em aumento da vazão regularizada, podendo inclusive ser superior a 100% da vazão média, para uma situação teórica sem perdas por evaporação.

Pode-se distinguir a predominância de tendência única na faixa de vazão regularizada específica de 0% a 60% da vazão média de longo período, salvo os postos de Pau dos Ferros e Pedra de Abelha que fugiram da tendência geral e não farão parte na composição da curva regional. Na realidade se o limite considerado fosse 40% o posto de Pedras poderia ser considerado na tendência conjunta.

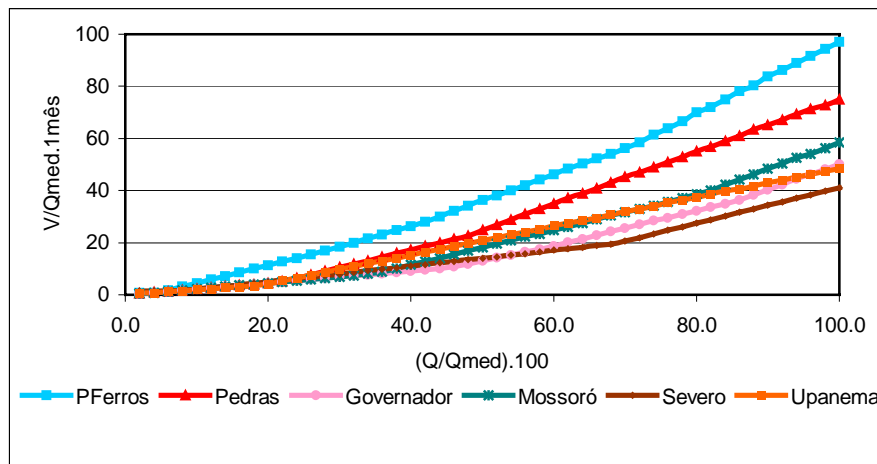


Figura 3: Curvas individuais de regularização com garantia de 100%.

Função Regional

A curva média na faixa de variação de vazão de 0 a 60% foi obtida pela média aritmética dos valores de vazão regularizada para cada volume testado. A Figura 4 apresenta as curvas regionais para cada nível de garantia.

Foram ajustadas funções polinomiais às curvas regionais, cujas equações estão apresentadas a seguir.

Garantia de 100%:

$$V/Q_{m.mês} = 0.0037[(Q/Q_{med})100]^2 + 0.1339 [(Q/Q_{med})100] + 0.4278 (R^2 = 0.9999) \quad (9)$$

Garantia de 95% :

$$V/Q_{m.mês} = 0.0039[(Q/Q_{med})100]^2 + 0.0398 [(Q/Q_{med})100] + 0.6917 (R^2 = 0.9997) \quad (10)$$

Garantia de 90% :

$$V/Q_{m.mês} = 0.0029[(Q/Q_{med})100]^2 + 0.0298 [(Q/Q_{med})100] + 0.4126 (R^2 = 0.9998) \quad (11)$$

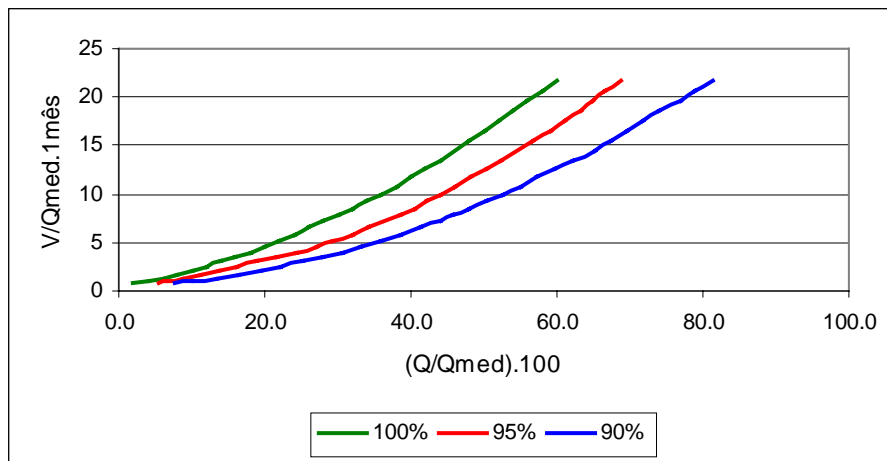


Figura 4: Curvas regionais de regularização para garantias de 100, 95 e 90%.

Observa-se que, na situação teórica sem perdas por evaporação, uma pequeno decréscimo de garantia (passando de 100 a 95%), representa uma ganho significativo na vazão regularizada (da ordem de 8%) e que o ganho na vazão regularizada aumenta com o aumento do volume do reservatório.

Avaliação das perdas por evaporação

As curvas de regularização obtidas até aqui não consideram as perdas por evaporação no reservatório, cuja avaliação depende da relação cota-área-volume do mesmo, e esta informação normalmente não está disponível na etapa de planejamento.

De acordo com Tucci (1993), a evaporação pode ser considerada como uma demanda adicional do reservatório e pode ser estimada considerando-se uma área correspondente a 2/3 da área máxima do espelho d'água do reservatório e a evaporação média anual da região.

Neste trabalho, se apresenta uma metodologia alternativa para regionalizar a evaporação em função da área máxima do espelho d'água no reservatório. A metodologia proposta se baseia no princípio de que são possíveis de regionalizar tanto os regimes fluviais, pluviais e evaporimétrico de uma região, como também o comportamento topográfico médio dos açudes. Para tal, dentro do programa de balanço hídrico foi adicionado o cálculo da evaporação média dos açudes para cada volume simulado, dentro do período de dados. Através de análise de regressão, obteve-se a equação 12 que relaciona a evaporação (E_p), em percentagem da vazão média de longo termo, com a área máxima do espelho d'água do reservatório ($A_{máx}$).

$$E_p = 0,75173 \cdot A_{máx}^{0,90231} \quad (12)$$

A evaporação média do reservatório, estimada pela equação 12, deve ser considerada como uma demanda adicional do reservatório, assim como na metodologia simplificada apresentada por

Tucci (1993). No entanto, para que esta metodologia possa ser efetivamente útil em estudos de regionalização, os reservatórios utilizados na determinação da equação devem ser representativos dos que poderão ser utilizados para os locais sem dados. A amostra utilizada neste estudo é muito pequena para uma conclusão mais ampla.

Com o objetivo de avaliar a aplicabilidade destas metodologias no âmbito da região estudada, foram utilizados dados de três açudes existentes na bacia hidrográfica do rio Apodí-Mossoró, nas áreas de domínio dos postos fluviométricos de Governador (açude Pau dos Ferros), Mossoró (açude Santa Cruz) e Upanema (açude Umari), para verificação das perdas reais calculadas pela técnica de balanço hídrico e compará-las com a metodologia de Tucci (1993) e aquela sugerida neste trabalho.

Com base nas curvas cota-área-volume e nos dados hidroclimatológicos de cada bacia hidrográfica (evaporação, chuva e vazão mensais), efetuou-se o balanço hídrico dos três açudes. As Figuras 5, 6 e 7 apresentam as curvas de regularização obtida para cada açude, considerando os casos sem perdas e com perdas por evaporação calculadas através das duas metodologias acima citadas.

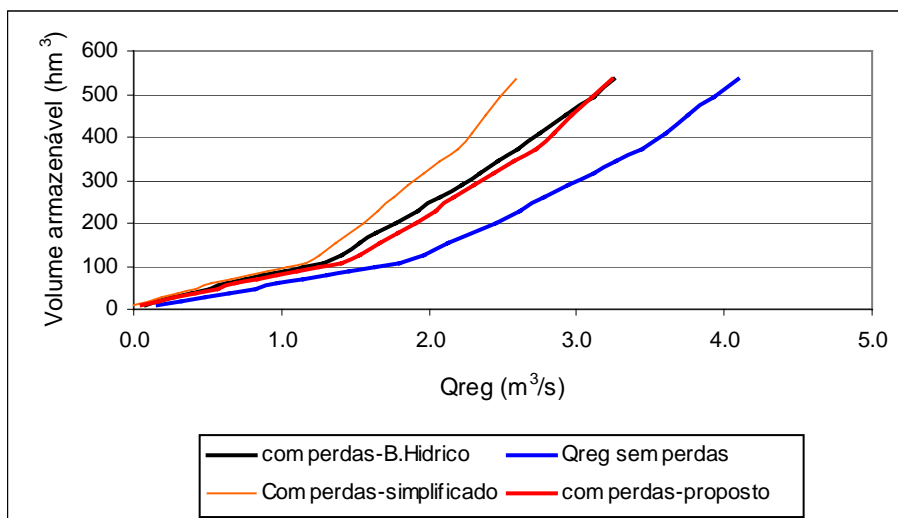


Figura 5: Curva de regularização do açude Pau dos Ferros

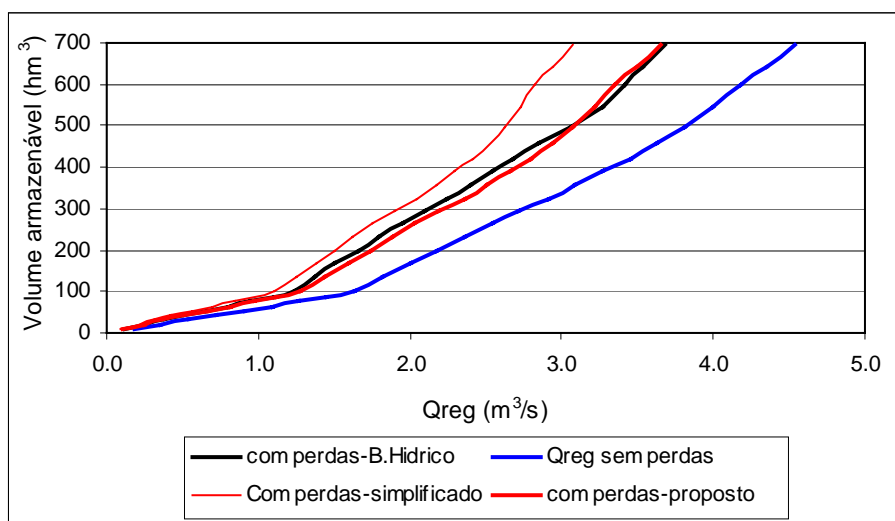


Figura 6: Curva de regularização do açude Santa Cruz

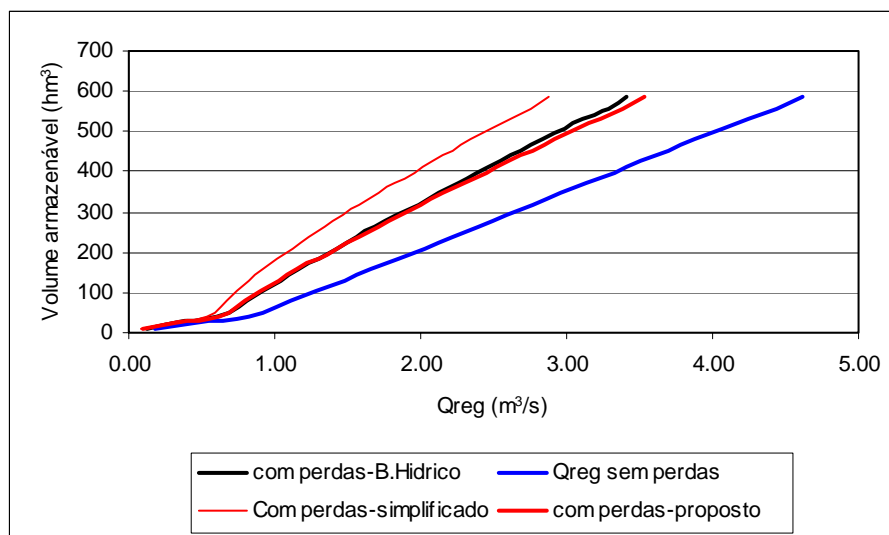


Figura 7: Curva de regularização do açude Umari

Como se esperava, ocorre uma diminuição substancial da vazão regularizável, quando são consideradas as perdas por evaporação em todos os três açudes (cerca de 27%), sendo mais acentuada nas cotas mais baixas, em termos percentuais. A metodologia simplificada superestima as perdas por evaporação, em relação àquelas obtidas através do balanço hídrico, ocasionando uma redução na vazão regularizada em cerca de 17%. O método proposto apresenta uma estimativa bem próxima da real, com uma leve tendência a subestimar as perdas por evaporação.

CONCLUSÕES

Os resultados obtidos permitem concluir que: (a) O conceito de garantia foi associado às curvas adimensionais regionais de regularização, podendo ser utilizado para determinar o volume necessário para regularizar uma vazão para um nível de probabilidade da série histórica; (b) Os volumes a serem armazenados, obtidos das curvas de regularização, não consideram as evaporações que ocorrerão no espelho d'água do reservatório a ser construído. Por isso, os valores obtidos necessitam ser corrigidos para considerar as perdas por evaporação, as quais, na região da bacia hidrográfica estudada, é de muita relevância. A comparação entre a metodologia simplificada apresentada por Tucci (1993) e o método de simulação, mostrou que a metodologia simplificada superestimou a evaporação na bacia estudada; (c) O método proposto para estimar as perdas por evaporação na regionalização da curva de regularização mostrou-se satisfatório, apresentando erros em torno dos 2%. Deve-se lembrar, no entanto, que esta metodologia foi testada em um número reduzido de reservatórios, sendo necessário testá-la em mais reservatórios da região. Além disso,

como os dados dos próprios reservatórios foram utilizados no ajuste da equação o método não foi validado para outros reservatórios.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Bristot, G. 1999. *Estimativas da necessidade de irrigação suplementar para algumas culturas no Estado do Rio Grande do Norte*. Dissertação (mestrado). Universidade federal da Paraíba – UFPb. Campina Grande. Pb.
- Domokos, M. e Gilyén-Hofer, A. 1990. *Regionalized estimation of reservoir capacity-yield curves in Hungary*. In: Regionalization in Hydrology: proceeding. IAHS Publication, no 191.
- Obregon, E.P; Tucci, C.E.M. e Goldenfum, J.A. 1999. Regionalização de vazões com base em séries estendidas: bacias afluentes a Lagoa Mirim-RS. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, RS, **4** (1), 57-75.
- Strobel, O. M. 1987. Identificação de regiões hidrologicamente homogêneas através de análise fatorial de componentes principais, *Revista Brasileira de Engenharia*, **5** (1), 31-52.
- Tucci, C. E. M., 2000. *Regionalização de Vazões*. Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. Porto Alegre, RS: IPH/UFRGS.
- Tucci, C.E.M. 1993. *Regionalização de vazões*. In: Hidrologia- ciência e aplicação. Coordenador Tucci, C.E. 2 ed/Porto Alegre: Editora da Universidade: ABRH, (Coleção ABRH de Recursos Hídricos, v. 4). Cap 15, p. 573 a 620.
- Tucci, C.E.M e Goldenfum, J.A. 1991. Regionalização de curvas de regularização. *Revista Brasileira de Engenharia*, **9** (2), 53-70.
- Vieira, V. P. P. B.1999. *Água doce no semi-árido*. In: Águas doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação. Organização e coordenação científica Rebouças, A.C., Braga, B. Tundisi, J.G. São Paulo. Escrituras Editora. Cap. 15. pg. 509 a 532.