

XXIII SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

VAZÃO DE REGULARIZAÇÃO - INFLUÊNCIA DA FUNÇÃO OBJETIVO NAS GARANTIAS DE RESERVATÓRIOS SUPERFICIAIS

*Victor Santos Galvão Baptista*¹; *Gerald N. Souza da Silva*²; *Cristiano das Neves Almeida*³

RESUMO – A vazão regularizada de reservatórios de acumulação de água tem como um dos objetivos o atendimento das demandas consumptivas durante o período de estiagem. A garantia de regularizar uma certa vazão tem sido utilizada na gestão de recursos hídricos como critério para outorgar os usos da água do reservatório ou para a perenização do rio/uso a jusante. As vazões afluentes a um reservatório, necessárias para determinar as garantias, são obtidas geralmente com modelos hidrológicos do tipo chuva-vazão. Entretanto, frequentemente observam-se diferenças nos resultados dos estudos efetuados. Inúmeras variáveis podem influenciar nos resultados, como a evapotranspiração na bacia hidrográfica e incertezas sobre a precipitação. Além disso, um aspecto na modelagem é a calibração do modelo, que utiliza uma função objetivo para aproximar dados observados e calculados. Neste estudo analisa-se o impacto de diferentes funções objetivos para as garantias de dois reservatórios estratégicos localizados no Estado da Paraíba utilizando o modelo chuva-vazão SMAP. Os resultados mostram que a escolha da função objetivo na calibração dos parâmetros do SMAP exerce influência direta na vazão regularizada. Ainda, conclui-se que funções objetivos que priorizam vazões mínimas não são adequadas para calibração do SMAP em reservatórios da região semiárida, nos quais há frequentes períodos de estiagem.

ABSTRACT – The regularized flow from water reservoirs has as one of its objectives the water consumption supply during drought periods. The guarantee of regularizing a certain flow has been utilized in water resources management to grant users access to the water from the reservoir or for downstream flow regulation. Affluent flows into a reservoir which are needed to determine guarantees are usually obtained using hydrologic models, however differences in results of studies carried out are frequently observed. Numerous variables may influence the results, such as watershed evapotranspiration and uncertainties from precipitation. Besides, one aspect of modelling is the model calibration, which uses an objective function to approximate observed data from calculated ones. In this study it is analyzed the impact from different objective functions into the guarantees of two strategic reservoirs located at the Paraíba State utilizing the SMAP rainfall-runoff model. Results show that the choice of the objective function in the calibration of SMAP parameters exerts direct influence on the regularized flow. Also, it is concluded that objective functions which prioritizes minimum flows are not adequate for SMAP calibration in reservoirs in the semiarid region, in which there are frequent drought periods.

Palavras-Chave – Modelagem; Reservatórios; Calibração.

¹) Pós-graduação em engenharia civil e ambiental/UFPB, João Pessoa – PB. E-mail: victorsgb@gmail.com

²) Professor adjunto UFCG, Pombal – PB. E-mail: geraldsouzadasilva@gmail.com

³) Professor associado UFPB, João Pessoa – PB. E-mail: almeida74br@yahoo.com.br

INTRODUÇÃO

O uso de vazões de referência (vazão de base, vazão média de longo prazo, vazão mínima com sete dias de duração e tempo de retorno de dez anos – $Q_{7,10}$) é comum para as diversas etapas da gestão dos recursos hídricos. O escoamento de base, por exemplo, é entendida como o escoamento natural de rios, mantida pela descarga d'água subterrânea nas nascentes dos rios, sendo esta a sua origem. É comum que vazões regularizadas associadas a um certo nível aceitável de garantia de atendimento sejam usadas como instrumentos de outorga de uso d'água por parte dos órgãos gestores de recursos hídricos, sobretudo para atenuar a variabilidade temporal da vazão pela acumulação de parte das águas disponíveis no período chuvoso e redução do déficit hídrico nos períodos de estiagem (Collischonn e Dornelles, 2013).

Num contexto em que dados consistentes de monitoramento fluviométrico ou nível d'água de reservatórios, os quais podem ser associados ao volume dos mesmos mediante o uso de curvas cota-volume, são praticamente inexistentes ou muito onerosos. Assim, a tendência global tem sido a implementação de modelagem hidrológica visando prover um entendimento integrado do comportamento de bacias hidrográficas. Em geral, os modelos existentes desempenham melhor sua função em regiões úmidas, nos quais a maioria foram desenvolvidos, embora existam abordagens que visam modelar o comportamento chuva-vazão em regiões semiáridas (Jiang *et al.*, 2015).

Dentre os componentes do ciclo hidrológico, a vazão é a mais utilizada na calibração dos modelos chuva-vazão, nos quais os parâmetros dos modelos têm seus valores ajustados por meio de otimização a fim de que os valores calculados de vazão se aproximem o máximo possível dos valores observados. Nesse processo, a função objetivo utilizada pelo modelo têm um papel fundamental no resultado e na qualidade da calibração, tendo em vista a finalidade da modelagem hidrológica. Cada função objetivo atua priorizando a aproximação de vazões observadas e calculadas em certa fase do regime fluviométrico, e dessa forma acaba tendo sua performance prejudicada em outras fases. Por exemplo, uma função objetivo que enfatize as vazões de pico geralmente não provê resultados com a mesma precisão na estimativa de vazões de base que outra função objetivo que priorize as vazões mínimas na calibração dos parâmetros. Isso é especialmente importante na calibração de modelos para o semiárido, em que a alta variabilidade pluviométrica em geral provoca a intermitência dos rios.

Este artigo objetiva analisar o papel que a função objetivo exerce na calibração automática do modelo chuva-vazão SMAP, e por consequência o impacto dela sobre as vazões regularizadas associadas à níveis de garantia de atendimento de dois açudes importantes do Estado da Paraíba, localizados em regiões climáticas distintas.

ÁREA DE ESTUDO

O estudo foi realizado para dois reservatórios estratégicos localizados no estado da Paraíba, sendo um na região semiárida (o açude Epitácio Pessoa) e um na região litorânea (o açude Gramame-

Mamuaba). O açude Epitácio Pessoa, localizado na Mesorregião da Borborema, no Cariri Oriental, tem uma capacidade de acumulação de 411,686 hm³ e abastece 25 municípios do Estado da Paraíba. Já o açude Gramame-Mamuaba, com uma capacidade de acumulação de 56,937 hm³, faz parte do sistema integrado do abastecimento da Grande João Pessoa e se localiza na Mesorregião da Mata Paraibana, mais especificamente no Litoral Sul do Estado. A Figura 1 mostra o mapa da localização dos açudes com as respectivas bacias hidrográficas.

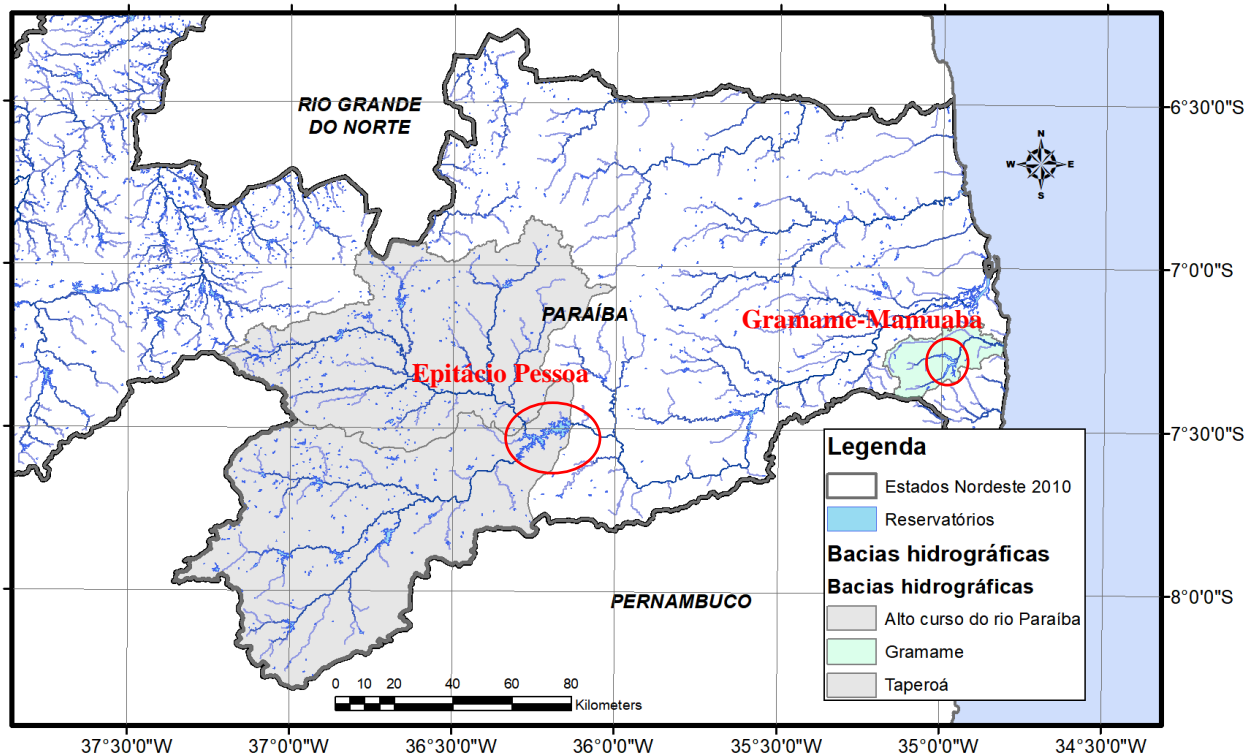


Figura 1 – Mapa área de estudo

A Tabela 1 exibe as principais características dos dois açudes estudados.

Tabela 1 – Dados reservatórios

Dado \ Açude	Epitácio Pessoa	Gramame- Mamuaba
Latitude	-7,538150	-7,296230
Longitude	-36,231900	-34,967240
Volume morto	34.190.000 m ³	2.846.850 m ³
Município	Boqueirão/PB	Alhandra/PB
Curso barrado	Rio Paraíba	Rios Gramame e Mamuaba
Precipitação representativa	Boqueirão	Santa Rita
Município representativo da evaporação (Hargreaves e Samani, 1985)	Campina Grande	João Pessoa

MÉTODOS

A modelagem das vazões afluentes aos dois reservatórios foi realizada por meio do modelo de simulação hidrológica do tipo chuva-vazão SMAP, na sua versão diária. O modelo SMAP foi

desenvolvido por Lopes *et al.* (1981). É um modelo determinístico de simulação hidrológica do tipo transformação chuva-vazão, mais exatamente do tipo tanque correlato do tempo com fluxo não permanente. O modelo já é amplamente aplicado em bacias hidrográficas do Brasil e foi recentemente utilizado na elaboração do Plano Diretor de Recursos Hídricos da bacia hidrográfica do rio Piranhas-Açu. A Figura 2 mostra o esquema do modelo SMAP.

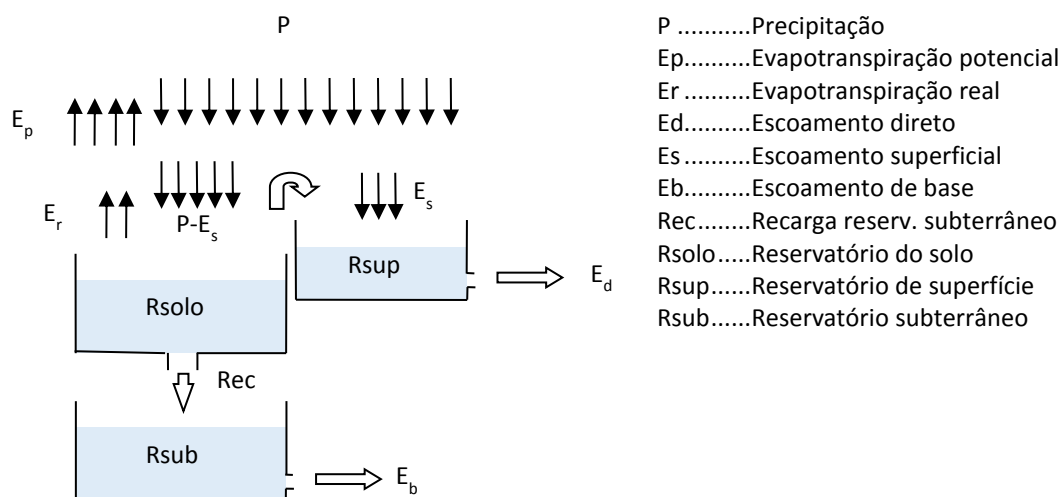


Figura 2 – Esquema do modelo SMAP

Este modelo foi utilizado para a geração das séries pseudo-históricas das vazões afluentes aos reservatórios Epitácio Pessoa e Gramame-Mamuaba. No caso do Gramame-Mamuaba, foi utilizado o modelo SMAP original, em que há um reservatório subterrâneo (RSub) que gera o escoamento de base na época seca. O modelo foi adaptado para o reservatório Epitacio Pessoa localizado na região semi-árida (aquífero cristalino), de modo que nesse caso desconsiderou-se o reservatório subterrâneo (Rsub) do modelo e assim não foram gerados escoamentos de base nos reservatórios/bacias localizados nessa região.

Os dados de entrada são a precipitação e a evapotranspiração potencial diárias, assim como a área da bacia hidrográfica não controlada. Os parâmetros do modelo se encontram na Tabela 2.

Tabela 2 – Parâmetros do SMAP

Parâmetro	Descrição	Intervalo limite
Str	Capacidade de saturação do solo (Rsolo)	100 – 2000 (mm)
K2t	Constante de recessão do escoamento superficial (Rsup)	2,0 – 5,0 (dias)
Crec	Recarga subterrânea	0 – 20 (mm/dia)
Ai	Abstração inicial	2,5 – 5,1 (mm)
Capc	Capacidade de campo	30 – 50 (%)
Kkt	Constante de recessão do escoamento de base	30 – 180 (dias)

O modelo foi calibrado com os dados fluviométricos e pseudo-fluviométricos (dados obtidos por meio de balanço hídrico a partir dos volumes efetivamente monitorados nos reservatórios). O reservatório Epitácio Pessoa foi calibrado com dados observados no posto fluviométrico Poço de Pedra (Código Hidroweb ANA: 38850000), localizado a montante do referido reservatório; e o reservatório Gramame-Mambuaba foi calibrado com dados do monitoramento de nível dos reservatórios da AESA (balanço hídrico do reservatório). O modelo chuva-vazão SMAP foi calibrado automaticamente com a técnica dos Algoritmos Genéticos (AG's). O algoritmo utilizado foi desenvolvido por Soares Junior *et al.* (2009). O método não é detalhado aqui, pois existe extensa literatura sobre o tema, por exemplo, Linden (2008) ou Galvão e Mêuser *et al.* (1999).

Para analisar a influência que a Função Objetivo (FO) pode exercer sobre as vazões calculadas por um modelo chuva-vazão, foram consideradas três Funções Objetivo (Diniz, 2008). A primeira FO (Equação 1) dá ênfase às vazões mínimas, enquanto que a terceira (Equação 3) dá ênfase às vazões máximas. A segunda FO não dá privilégio à qualquer magnitude de vazões (Equação 2).

$$FO = \sum \left(\frac{1}{Q_o} - \frac{1}{Q_s} \right)^2 \quad (1)$$

$$FO = \sum \left(\frac{Q_o - Q_s}{Q_o} \right)^2 \quad (2)$$

$$FO = \frac{\sum (Q_s - Q_o)^2}{\sum (Q_o - Q_o)^2} \quad (3)$$

Onde Q_s é a vazão calculada e Q_o é a vazão observada, ambas em m^3/s . As precipitações médias, em mm, utilizadas como entrada no modelo têm periodicidade diária. Entretanto, os resultados do modelo, as séries pseudo-históricas ou simuladas, têm uma periodicidade mensal de vazões. Foram simulados 56 anos de dados, equivalente ao período de 1962 a 2017. A evapotranspiração potencial média diária, em mm, foi determinada conforme Hargreaves e Samani (1985).

A partir das séries de vazões afluentes geradas pelo modelo SMAP foram então traçadas as curvas de garantia para os dois açudes estudados, e então comparadas essas curvas de garantias, a fim de se quantificar as diferenças entre curvas e valores de vazões. Para o traçado das curvas de garantia, fez-se necessário o cálculo de balanço hídrico mensal no período considerado, no qual também foram utilizadas, além das séries de vazões afluentes, o volume precipitado e evaporado mensalmente, calculados a partir de dados de precipitação e evaporação representativos dos açudes em questão. O balanço hídrico foi realizado para determinar quais as vazões regularizadas que mantêm a garantia de disponibilidade hídrica de 100% a 90%. A Tabela 3 e a Tabela 4 exibe os valores médios de cada mês do ano de precipitação e evaporação dos açudes Epitácio Pessoa e Gramame-Mambuaba, respectivamente.

Tabela 3 – Valores médios de precipitação e evaporação do açude Epitácio Pessoa

Grandeza \ Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Precipitação (mm)	36,0	43,9	69,8	78,7	49,4	56,1	51,3	22,8	11,0	4,6	7,3	13,8
Evaporação (mm)	177,3	157,1	153,5	125,4	98,9	82,5	88,7	109,1	138,6	167,1	171,6	177,3

Tabela 4 – Valores médios de precipitação e evaporação do açude Gramame-Mamuaba

Grandeza \ Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Precipitação (mm)	76,0	91,9	146,2	188,1	202,0	245,5	204,4	110,8	64,0	29,2	27,0	38,7
Evaporação (mm)	167,1	147,8	153,5	128,7	105,7	92,4	98,9	115,9	135,3	160,3	161,7	167,1

O valor percentual da garantia dos reservatórios foi calculado segundo a Equação 4:

$$G(\%) = \frac{100 \times (\sum M - \sum M_f)}{\sum M} \quad (4)$$

Onde $\sum M$ é a quantidade total de meses da série utilizada no processamento do balanço hídrico mensal e $\sum M_f$ é a quantidade total de meses em que houve falha, ou seja, em que a vazão retirada não foi atendida. Portanto, a garantia $G(\%)$ varia de 0 a 100%, sendo o valor nulo obtido caso todos os meses fossem considerados com falha e o valor máximo obtido caso nenhum mês com falha ocorresse em toda a série. Um mês com falha é definido quando o volume acumulado é calculado e seu valor se encontra inferior ao volume morto do reservatório em questão, o que implica que a vazão retirada não pode ser atendida nesse mês. Nesse caso, a vazão regularizada adotada para o reservatório, ou fração dela, continua a ser retirada mensalmente até que o reservatório venha a secar completamente. Essa consideração foi implementada nas simulações de balanço hídrico, uma vez que isso de fato ocorre na prática. Mesmo quando a vazão regularizada se manteve a mesma, nos meses em que o volume acumulado se tornou inferior ao volume morto, tais meses foram computados como meses com falha.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 5 mostra os parâmetros obtidos na calibração do reservatório Gramame-Mamuaba com o modelo original, enquanto que a Tabela 6 mostra os resultados para o reservatório Epitácio Pessoa, com o modelo sem fluxo de base ou subterrâneo. Observa-se que, os parâmetros obtidos com a FO (Equação 2) e (Equação 3) são bem próximos, com exceção dos parâmetros Recarga subterrânea (Crec) e Abstração inicial (Ai), cujos valores da Equação 2 foram muito diferentes da Equação 3 nos reservatórios Gramame-Mamuaba e Epitácio Pessoa, respectivamente. Já a FO que enfatiza um ajuste das vazões de baixa magnitude resultou em parâmetros totalmente diferentes.

Tabela 5 – Resultados da calibração do reservatório Gramame-Mamuaba

Função objetivo	Str (mm)	K2t (dias)	Crec (mm/dia)	Ai (mm)	Capc (%)	Kkt (dias)
Baixa (Equação 1)	128,54	4,98	7,48	4,19	32,77	55,19
Média (Equação 3)	285,20	1,99	3,99	2,65	49,95	52,28
Alta (Equação 2)	313,93	1,80	12,78	2,56	43,84	53,60

Tabela 6 – Resultados da calibração do reservatório Epitácio Pessoa

Função objetivo	Str (mm)	K2t (dias)	Ai (mm)	Capc (%)
Baixa (Equação 1)	100,0	5,0	2,5	50,0
Média (Equação 3)	308,41	1,93	5,04	34,89
Alta (Equação 2)	288,08	1,96	2,51	30,55

Observa-se na Tabela 7 a influência das diferentes FOs adotadas neste estudo na vazão afluente média aos reservatórios. Para o açude Epitácio Pessoa, observa-se que a FO que dá ênfase às vazões de baixa magnitude (Equação 1) resultou em vazão afluente média anual muito superior às vazões oriundas das demais FOs. No açude Gramame-Mamuaba, a maior vazão afluente média anual registrada também foi proveniente da FO que enfatiza as vazões de baixa magnitude, embora que o resultado tenha sido mais próximo da FO que prioriza as vazões de pico (Equação 3). Para os dois reservatórios, observa-se que a FO que não prioriza nenhuma vazão resultou nos menores valores médios de vazão afluente. Os desvios padrão das médias anuais de vazão afluente do açude Gramame-Mamuaba foram relativamente menores que os obtidos no açude Epitácio Pessoa, indicando que a variação anual da fluviometria média do açude Gramame-Mamuaba, é relativamente menor que do açude Epitácio Pessoa, fato este coerente com a localização e clima dos açudes em questão. Isso também pode ser percebido através da observação da Figura 3 e da Figura 4. O impacto da FO é quase imperceptível no Gramame-Mamuaba (Figura 4) quando comparado ao Epitácio Pessoa (Figura 3).

Tabela 7 – Comparativo de vazão afluente média anual e respectivo desvio padrão (m³/s)

Reservatório	Função objetivo	Média anual (m ³ /s)	Desvio padrão (m ³ /s)
Epitácio Pessoa	Baixa (Equação 1)	13,97	16,27
	Média (Equação 3)	3,31	6,91
	Alta (Equação 2)	4,68	7,69
Gramame-Mamuaba	Baixa (Equação 1)	4,78	1,93
	Média (Equação 3)	3,96	1,89
	Alta (Equação 2)	4,42	1,91

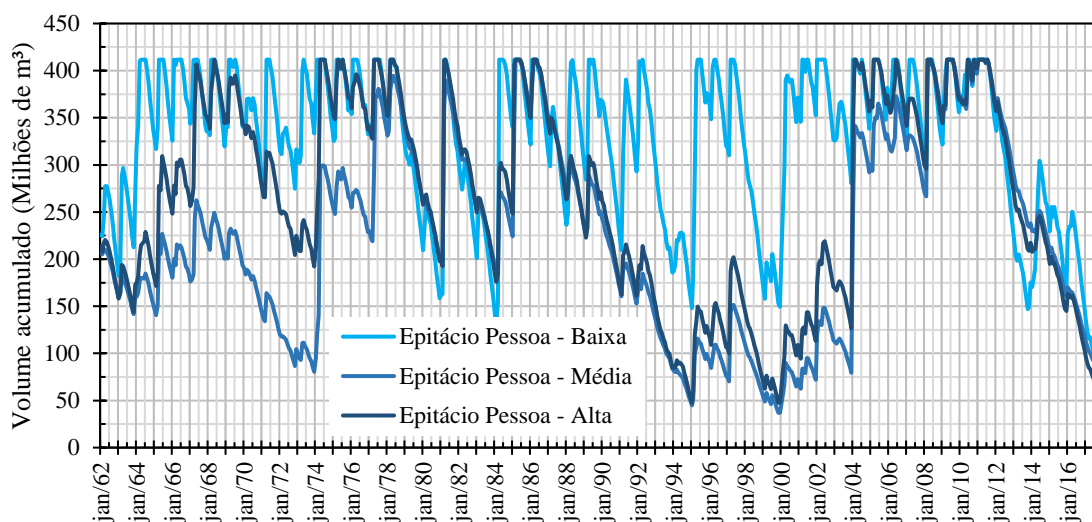


Figura 3 – Volume de água acumulado no reservatório Epitácio Pessoa oriundas de cada função objetivo

O volume médio extravasado anualmente do reservatório Gramame-Mamuaba foi de aproximadamente $7,4 \text{ hm}^3$, independente da FO utilizada, enquanto que a variação foi significativa para o reservatório Epitácio Pessoa ($2,9 \text{ hm}^3$, $4,6 \text{ hm}^3$ e $23,5 \text{ hm}^3$ para as FOs de ênfase nas vazões de média, alta e baixa magnitude, respectivamente). A razão para a extravasão, com uso da FO que enfatiza as vazões de baixa magnitude (Equação 3), ter sido bastante elevada é que essa função objetivo não conseguiu calibrar bem o modelo do SMAP; todos os parâmetros ficaram dentro de algum valor limite (Tabela 2 e Tabela 6). Isso aconteceu devido ao fato de que, durante os períodos de estiagem, não houve valores observados a serem utilizados na calibração e durante a cheia as vazões elevadas não têm impacto na função objetivo, prejudicando sua performance em representar o comportamento da fluviometria do reservatório, que se localiza na região semiárida.

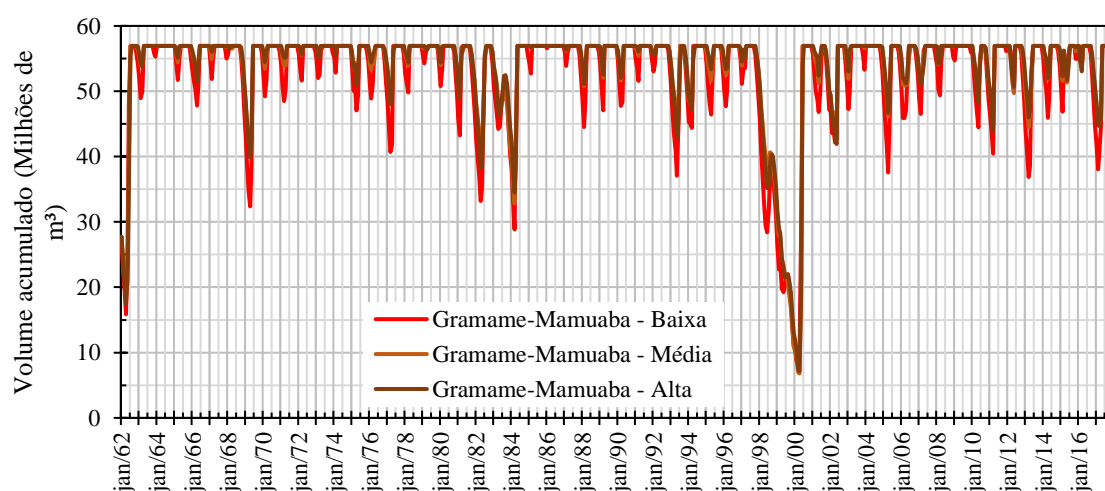


Figura 4 – Volume acumulado no reservatório Gramame-Mamuaba oriundas de cada função objetivo

A mesma correspondência da vazão afluente com as FOs (Tabela 7) pôde ser observada nas curvas de garantia (Figura 5). Para o açude Epitácio Pessoa, a vazão regularizada associada à garantia

de 100% variou de 1,32 m³/s (FO média; Equação 3) para 3,86 m³/s (FO baixa; Equação 1), com um aumento de 192%. Já o açude Gramame-Mamuaba teve sua vazão regularizada variando de 1,24 m³/s para 1,88 m³/s para o mesmo cenário e mesma garantia, o que correspondeu a um aumento de 52%. Pôde-se observar também, comparando as vazões regularizadas associadas às garantias de 100% e 90%, que em geral as três curvas do reservatório Gramame-Mamuaba se mantiveram mais semelhantes que o conjunto de curvas do reservatório Epitácio Pessoa (coeficiente de variação da média das diferenças relativas às vazões regularizadas de 100% de garantia de 0,21 e 0,37, para o Gramame-Mamuaba e Epitácio Pessoa, respectivamente).

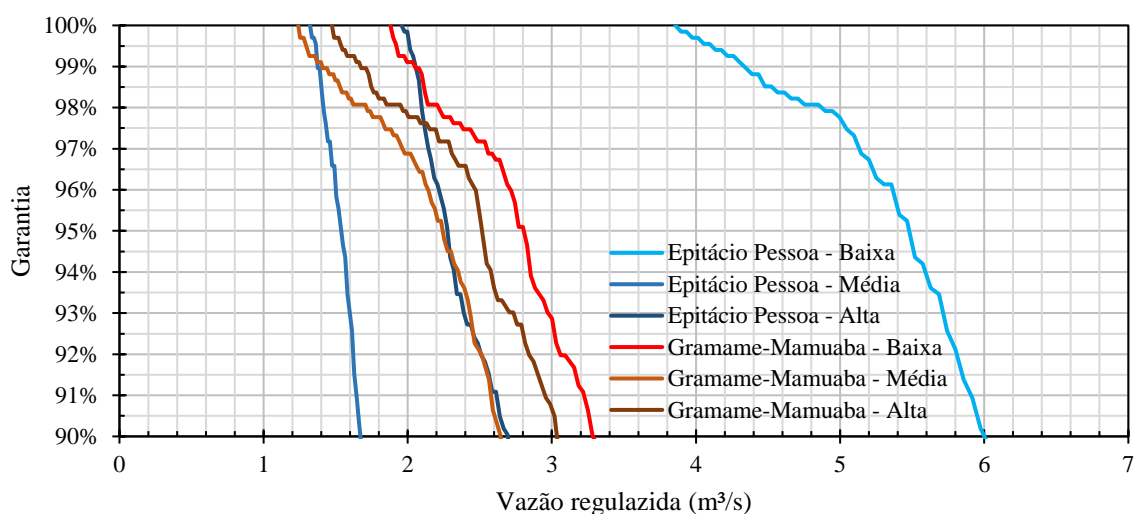


Figura 5 – Curvas de garantia dos reservatórios oriundas de cada função objetivo

CONCLUSÕES

Conclui-se, portanto, que a escolha da função objetivo na calibração dos parâmetros do SMAP exerce influência direta nos valores de vazão regularizada de 100% de garantia, independente da consideração ou não do reservatório subterrâneo R_{sub} , como se observa nos resultados obtidos para os açudes Gramame-Mamuaba e Epitácio Pessoa. A etapa de calibração do modelo SMAP é de fundamental importância para as análises de balanço hídrico que fundamentam a construção das curvas de garantia, tendo em vista que a vazão afluente resultante é o que mais impacta na capacidade dos reservatórios de proverem certa demanda regularizada. Ainda, conclui-se também que o uso de funções objetivos que enfatizam as vazões mínimas não fazem sentido para a região semiárida, em que há grandes períodos de estiagem, sem dados de vazão passíveis de serem utilizadas na calibração do modelo.

REFERÊNCIAS

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. (2013). *Hidrologia para Engenharia e Ciências Ambientais*. Associação Brasileira de Recursos Hídricos Porto Alegre- RS, 350 p.

DINIZ, L. S. (2008). *Regionalização de Parâmetros de Modelo Chuva-vazão Usando Redes Neurais*. Tese de Doutorado. UFRGS Porto Alegre- RS, 197 p.

GALVÃO, C. O.; MÊUSER, J. S. V. (1999). *Sistemas Inteligentes, Aplicações a Recursos Hídricos e Ciências Ambientais*. Universidade/UFRGS/ABRH Porto Alegre- RS, 246 p.

HARGREAVES, G. H.; SAMANI, Z. A. (1985). “Reference crop evapotranspiration from temperature”. *Applied Engineering in Agriculture* 1(2), pp. 96 – 99.

JIANG, Y.; LIU, C.; LI, X.; LIU, L.; WANG, H. (2015). “Rainfall-runoff modelling, parameter estimation and sensitivity analysis in a semiarid catchment”. *Environmental Modelling & Software* 67, pp. 72 – 88.

LINDEN, R. (2008). *Algoritmos Genéticos*. Brasport Rio de Janeiro- RJ, 496 p.

LOPES, J. E. G.; BRAGA, B. P. F.; CONEJO, J. G. L. (1981). *Hydrologic simulation: application of a simplified model*. in *Anais do Symposium of Water Resources*, Fortaleza, 1981. p. 42 – 62

SOARES JUNIOR, A. *et al.* (2009). “An XML-based genetic algorithm tool: system features and modeling”. in *Anais do XXX Congresso Ibero-Latino-Americano de Métodos Computacionais em Engenharia*, Armação dos Búzios, Nov. 2009