

ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DA VAZÃO REGULARIZÁVEL EM RESERVATÓRIOS DE DIFERENTES ESCALAS

Carlos Alexandre Gomes Costa^{1,5}; Deborah Mithya Barros Alexandre^{2,5}; Pedro Henrique Augusto Medeiros^{3,5}; José Carlos de Araújo^{4,5}

RESUMO – Os reservatórios superficiais constituem a principal fonte de oferta hídrica no Nordeste semi-árido, atendendo a mais de 90% da demanda na região. A gestão adequada desses recursos exige um conhecimento da capacidade de regularização de vazão para diferentes níveis de garantia e regras de operação. É necessário também que se entendam os efeitos de mudanças nas variáveis envolvidas sobre a vazão regularizável, uma vez que o desconhecimento de tais mudanças pode levar a uma gestão ineficiente. O aporte de sedimentos com conseqüente assoreamento do reservatório, por exemplo, provoca mudança de sua forma, tornando-o mais raso e mais susceptível a perdas por evaporação e vertimento. Variações no regime de vazões, por sua vez, podem mudar consideravelmente a capacidade de regularização de vazão, reduzindo-a nos casos de aumento da variabilidade temporal. Neste trabalho, utilizou-se o modelo VYELAS para simular a vazão regularizável por três reservatórios de diferentes capacidades: Orós (1.940 hm³), Benguê (19,6 hm³) e Boqueirão (0,06 hm³). Mudanças no coeficiente de forma do reservatório, no coeficiente de variação das vazões afluentes e na capacidade de armazenamento foram simuladas e seus efeitos sobre a capacidade de regularização de vazão foram analisados em cada uma das escalas.

ABSTRACT – Surface reservoirs are the main source of water supply in the Brazilian semi-arid Northeast, attending over 90% of the demand in the region. The proper management of these resources requires knowledge of the water yield capacity for different reliability levels and operational rules. It is also necessary to know the effects caused over water yield due to changes on the involved variables, since misunderstanding of such changes may lead to an inefficient management. Sediment inflow with consequent siltation of a surface reservoir, for example, changes its shape, making it more shallow and susceptible to evaporation and overflow losses. Variations in the regime of river discharges, on the other hand, may cause considerable changes to water yield capacity, reducing it in the cases of increased temporal variability. In this study, the VYELAS model was used to simulate the water yield by three reservoirs with different storage capacities: Orós (1,940 hm³), Benguê (19.6 hm³) and Boqueirão (0.06 hm³). Changes in the reservoir shape coefficient, in the coefficient of variation of river discharges and in the storage capacity were simulated and their effects over the water yield capacity were analyzed in each of the scales.

Palavras-chave: reservatório superficial, vazão regularizável, efeito de escala

1) Prof. Universidade Federal de Goiás, doutorando em Engenharia Agrícola - UFC. E-mail: costacag@gmail.com

2) Doutoranda em Engenharia Agrícola - UFC. E-mail: deborahmb@uol.com.br

3) Doutorando em Engenharia Civil - UFC. E-mail: phamedeiros@gmail.com

4) Professor associado do Departamento de Engenharia Agrícola - UFC. E-mail: jcaraujo@ufc.br

5) Pesquisador do Grupo HIDROSED (www.hidroсед.ufc.br)

INTRODUÇÃO

Na região Nordeste do Brasil, os reservatórios superficiais constituem-se na principal fonte de oferta de água com garantia para a sobrevivência e o desenvolvimento das mais diversas atividades. Araújo *et al.* (2005), afirmam que, no Ceará, cerca de 91% da oferta hídrica é proveniente de açudes.

Os reservatórios são formados por barragens implantadas nos cursos d'água com a finalidade de acumular parte das águas disponíveis nos períodos chuvosos, para compensação das deficiências nos períodos de estiagem exercendo, assim, um efeito regularizador das vazões naturais. Suas características físicas, como a capacidade de armazenamento, dependem das características topográficas do vale no qual está situado.

Como a ocorrência das vazões é aleatória, ou seja, não há possibilidade de previsão de ocorrências em longo prazo, também não é possível prever com precisão o tamanho da reserva de água necessária para suprimento das demandas de períodos futuros de estiagem. Tal fato leva o planejador de recursos hídricos a duas situações ineficientes: superdimensionar as reservas, à custa de altos investimentos no reservatório de acumulação ou, subdimensionar as reservas à custa de racionamento durante o período seco.

Com a implantação de um reservatório se modificam as vazões nos rios, alterando a garantia do suprimento de água a jusante do mesmo. As vazões a montante e a jusante do reservatório passam, portanto, a apresentar comportamentos diferentes quanto à garantia das disponibilidades. A jusante ocorre um aumento do valor da vazão mínima disponível (vazão de maior garantia), com a tendência de se aproximar do valor da vazão média.

Como é comum no Nordeste, dispõe-se de poucos dados para a representação de processos hidrológicos e, em muitos casos, faz-se necessária a modelagem de tais fenômenos. Na maioria das vezes, a escolha de um modelo que represente um fenômeno hidrológico é baseada na experiência, nunca se sabendo ao certo a função que representa tal processo. A modelagem de fenômenos hidrológicos torna-se prejudicada pelas incertezas geradas durante o processo.

Neste trabalho, realizou-se a simulação das vazões regularizáveis por três reservatórios de capacidades de acumulação diversas: Orós (1.940 hm³), Benguê (19,6 hm³) e Boqueirão (0,06 hm³). A avaliação da garantia de disponibilidade hídrica foi realizada utilizando-se o modelo VYELAS (*Volume-Yield Elasticity*). O objetivo geral é identificar a sensibilidade da mudança em variáveis físicas de hidrológicas sobre a vazão regularizável por reservatórios em diferentes escalas. A análise de sensibilidade das variáveis do modelo VYELAS nessas três escalas permite uma avaliação da influência da escala na regularização de vazão.

MATERIAIS E MÉTODOS

Reservatórios estudados

Os reservatórios estudados, quais sejam Orós, Benguê e Boqueirão, localizam-se na bacia do Alto Jaguaribe e estão situados nos exutórios de três bacias aninhadas, como ilustra a Figura 1. As bacias hidrográficas contribuintes aos reservatórios são de macro-, meso- e micro-escala, respectivamente, segundo classificação de Soulsby *et al.* (2004): micro-bacias são aquelas com áreas inferiores a 100 km², meso-bacias entre 100 e 1.000 km² e macro-bacias apresentam áreas maiores que 1.000 km².

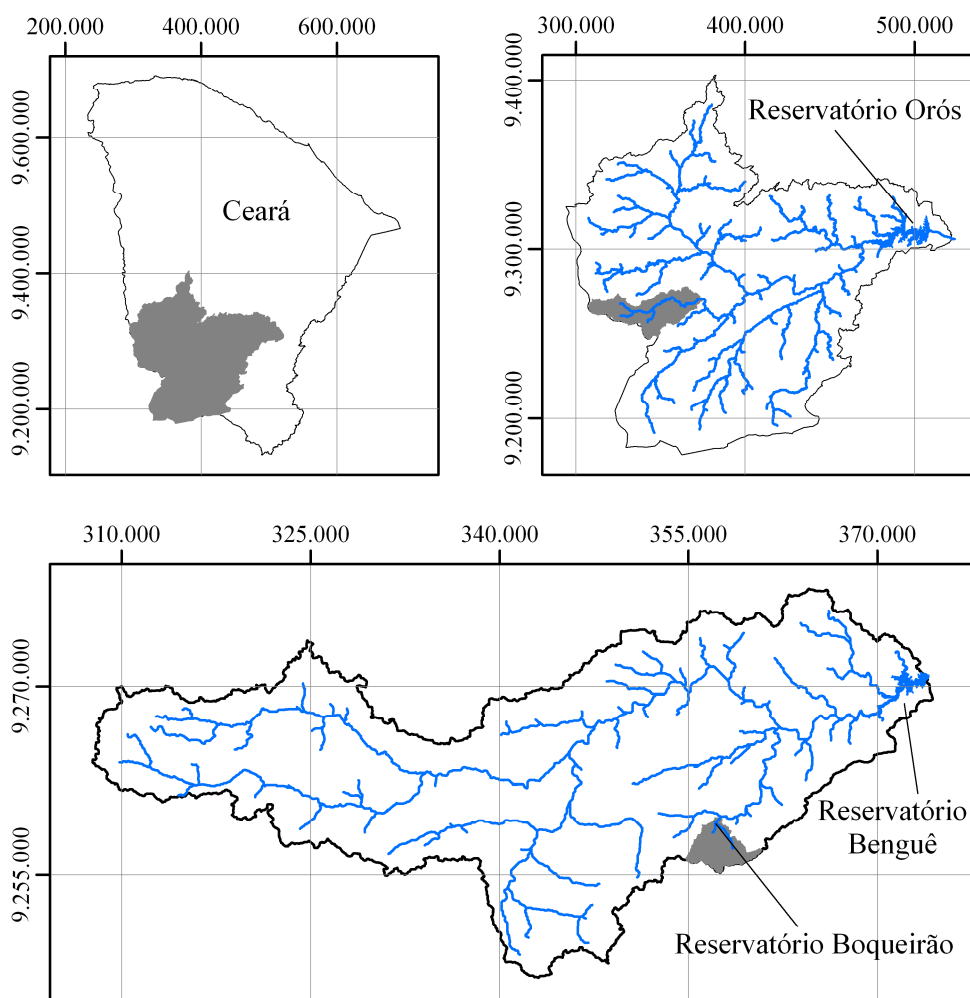


Figura 1 – Mapa de localização dos reservatórios Orós, Benguê e Boqueirão (coordenadas UTM, Zona 24S – Datum SAD-69)

A Tabela 1 apresenta as principais características dos reservatórios e de suas bacias hidrográficas.

Tabela 1 – Características dos reservatórios Orós, Benguê e Boqueirão

Característica	Reservatório		
	Orós	Benguê	Boqueirão
Bacia hidrográfica (km ²)	25.000	950	12
Bacia hidráulica (ha)	20.211	348	7,1
Capacidade de armazenamento (hm ³)	1.940	19,6	0,06
Coeficiente de forma, α ($V = \alpha \cdot y^3$)	26.761	2.781	587
Vazão afluente média anual (hm ³ /ano)	458,0	12,65	0,134
Coef. de variação dos deflúvios anuais	0,84	1,32	1,36
Evaporação média anual (mm)	1.988	2.548	2.548

Modelo VYELAS

O modelo VYELAS (*Volume-Yield Elasticity* – Araújo *et al.*, 2006) foi utilizado no presente estudo para simulação das vazões regularizáveis por reservatórios com diferentes garantias. O método consiste na simulação de longo prazo em termos de balanço hídrico do reservatório (equação 1).

$$\frac{\Delta V_{(t)}}{\Delta t} \cong (\overline{Q}_a) - (\overline{Q}_{ED} + \overline{Q}_w + \overline{Q}_o) + \delta Q \quad (1)$$

$$V(m^3) \cong \alpha \times y^3 \quad (2)$$

em que: V é o volume do reservatório; t é o tempo; \overline{Q}_a é a vazão afluente; \overline{Q}_{ED} é a evaporada do reservatório na estação seca; \overline{Q}_w é a vazão retirada do reservatório para uso; \overline{Q}_o é a vazão de sangria; δQ é a diferença entre as demais entradas (precipitação direta sobre o reservatório, contribuição subterrânea, infiltração e evaporação no período chuvoso).

Para simulação de longo prazo, o termo δQ é admitido insignificante (Campos, 1996; Araújo *et al.*, 2006). O volume de água no açude é estimado de acordo com a equação 2, em que y representa altura da água (m) e α é o coeficiente de morfologia (parâmetro de forma do reservatório).

O modelo VYELAS calcula o balanço hídrico em passo anual com base nas seguintes variáveis: vazão afluente média anual; coeficiente de variação do deflúvio afluente; coeficiente de forma do reservatório; evaporação no período seco; capacidade de armazenamento; volume mínimo operacional; volume no início da simulação; valores máximo e mínimo de vazões regularizáveis simuladas; número de vazões regularizáveis simuladas; número de simulações do procedimento estocástico.

O processo estocástico a que se refere o parágrafo anterior consiste na geração de uma série sintética de vazões anuais afluentes. Para isso utilizou-se o método de Monte Carlo, reproduzindo-

se a média histórica e o coeficiente de variação dos deflúvios anuais. Detalhes sobre o processo de geração de vazões podem ser encontrados em Araújo *et al.* (2006).

Para cálculo das vazões afluentes médias e dos coeficientes de variação dos deflúvios anuais, foram utilizados dados medidos de vazão diária no posto fluviométrico Iguatu (ANA, 2009), para o caso do reservatório Orós, e vazões diárias estimadas por balanço hídrico para os reservatórios Benguê (Medeiros, 2008) e Aiuaba (Costa, 2007; HIDROSED, 2009; Araújo e Piedra, 2009).

Os coeficientes de variação (CV) apresentados na Tabela 1, apesar de elevados são compatíveis com o comportamento hidrológico de regiões semi-áridas (Araújo e Piedra, 2009), onde o regime pluviométrico é caracterizado por elevada variação inter-anual. De acordo com Campos *et al.* (1997) os valores de CV de deflúvios anuais variam de 0,2, típicos de rios do Nordeste dos Estados Unidos, a 1,4, característicos de rios do semi-árido do Nordeste brasileiro.

O coeficiente de morfologia (Campos, 1996), que representa a forma do reservatório, indica o grau de exposição do espelho de água proporcional ao volume armazenado (Araújo *et al.*, 2006). Este coeficiente baseia-se na curva cota-volume do reservatório de acordo com a equação 3:

$$\bar{\alpha} = \frac{\sum V_i}{\sum (h_i^3)} \quad (3)$$

em que: $\bar{\alpha}$ é o coeficiente de morfologia; V é o volume do reservatório; h é a altura de água no reservatório para cada intervalo i . Os valores do coeficiente de morfologia para os três açudes estão presentes na Tabela 1.

A evaporação no período seco foi estimada de médias mensais das Normais Climatológicas (INMET, 1992) de acordo com estações meteorológicas próximas aos respectivos reservatórios (estação Iguatu para o açude Orós e estação Tauá para os açudes Benguê e Boqueirão). A evaporação do período seco ora apresentada contempla o total evaporado nos meses de julho a dezembro, mesmo critério utilizado por de Araújo *et al.* (2006).

A capacidade máxima de armazenamento dos reservatórios corresponde ao volume armazenado na cota de soleira do vertedouro, obtida dos respectivos projetos (Orós e Benguê) e levantadas em campo (Boqueirão). Como volume mínimo operacional, admitiu-se o equivalente a 5% da capacidade máxima dos reservatórios (Tabela 1). Este volume corresponde ao volume morto do reservatório, a partir do qual não se retira vazão alguma. O volume inicial da simulação assumido neste trabalho foi o correspondente a 10% da capacidade máxima dos reservatórios (Tabela 1).

Para realização do processo iterativo no modelo VYELAS são necessários as demais variáveis de entrada (Tabela 2). Estes valores foram considerados seguindo uma avaliação de campo e análise de dados históricos.

Tabela 2 – Demais variáveis de entrada do modelo para as bacias nas três escalas espaciais.

Variável	Reservatório		
	Orós	Benguê	Boqueirão
Número de vazões regularizáveis simuladas	100	100	100
Vazão mínima (hm ³ /ano)	194	1,96	0,006
Vazão máxima (hm ³ /ano)	970	9,8	0,03
Número de simulações no processo estocástico	5000	5000	5000

Simulação das curvas de garantia e análise de sensibilidade

As curvas de garantia dos açudes Orós, Benguê e Boqueirão foram determinadas para vazões regularizáveis com garantias entre 50% e 100%. Em geral, são exigidas garantias elevadas no fornecimento de água, havendo variações nas garantias para diferentes fins: 90% para projetos de irrigação; 95% para geração de energia e 99 a 100% para abastecimento humano e industrial (CEARÁ, 2005).

Neste estudo, as simulações para análise de sensibilidade da vazão regularizável às variáveis envolvidas, foram realizadas considerando-se uma garantia de 80% (Q_{80}). Isso porque, devido às suas dimensões, o reservatório Boqueirão é incapaz de regularizar qualquer vazão com 100% de garantia. Portanto, para fins de comparação, adotou-se uma garantia de oferta hídrica nas três escalas que possa ser atendida pelos reservatórios.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A disponibilidade hídrica pode ser impactada de acordo com duas perspectivas: a mudança da confiabilidade na vazão regularizável, e a mudança na vazão disponível a um nível de confiança (Araújo *et al.*, 2006). Para demonstrar a relação entre garantia de disponibilidade hídrica, são apresentadas a seguir as curvas de garantia dos reservatórios nas três escalas e a análise de sensibilidade da vazão regularizável com 80% de garantia em função de variações no fator de forma dos reservatórios, capacidade de acumulação e coeficiente de variação dos deflúvios anuais.

Curvas de garantia

Curvas de garantia representam um importante instrumento de gestão, pois identificam em uma figura única o nível de garantia para diferentes vazões regularizáveis. Essas curvas podem ser impactadas por assoreamento do reservatório, como demonstrado por Araújo e Medeiros (2008) e Araújo *et al.* (2003), ou por abstrações de água a montante do reservatório (Van Oel *et al.*, 2008), o que provoca a mudança no regime de vazões afluentes.

Neste estudo, as curvas de garantia dos açudes Orós, Benguê e Aiuaba (Figuras 2a, 2b e 2c, respectivamente) foram determinadas para a situação original do reservatório, sendo que os

impactos de mudanças de forma, capacidade e regime de vazões foram analisados para vazões com 80% de garantia (Q_{80}), conforme apresentado no item a seguir.

De acordo com as simulações, a vazão regularizável associada a uma garantia de 80% é de 312 hm³/ano (Figura 2a), 4,3 hm³/ano (Figura 2b) e 0,003 hm³/ano (Figura 2c) para os reservatórios Orós, Benguê e Boqueirão, respectivamente. Esses valores correspondem a vazões Q_{80} específicas de 12.480, 4.609 e 250 m³/km²/ano para os açudes Orós, Benguê e Boqueirão, respectivamente, mostrando um aumento da vazão específica regularizável com a escala. Essa mesma tendência se observa para outras garantias, indicando, de um modo geral, um aumento da eficiência hidrológica de reservatórios com o aumento da escala. Não obstante sua baixa eficiência relativa, pequenos reservatórios desempenham um importante papel na distribuição espacial da disponibilidade hídrica bem como na retenção de sedimentos que, caso contrário, assoreariam os reservatórios estratégicos (Mamede, 2008). Assim, tais reservatórios não devem ser ignorados em políticas de gestão de recursos hídricos. Grandes reservatórios, por outro lado, representam reservas estratégicas em um regime hidrológico com elevada variabilidade, típico do semiárido brasileiro, disponibilizando vazões com elevada garantia.

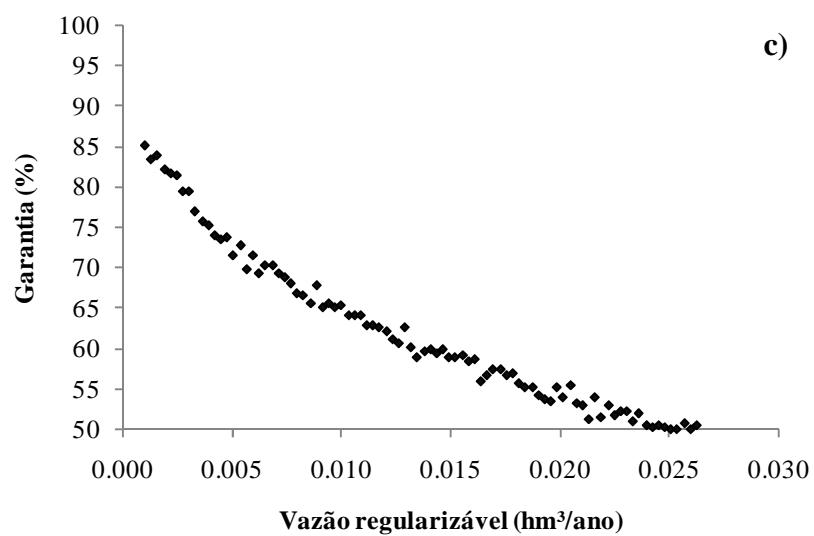
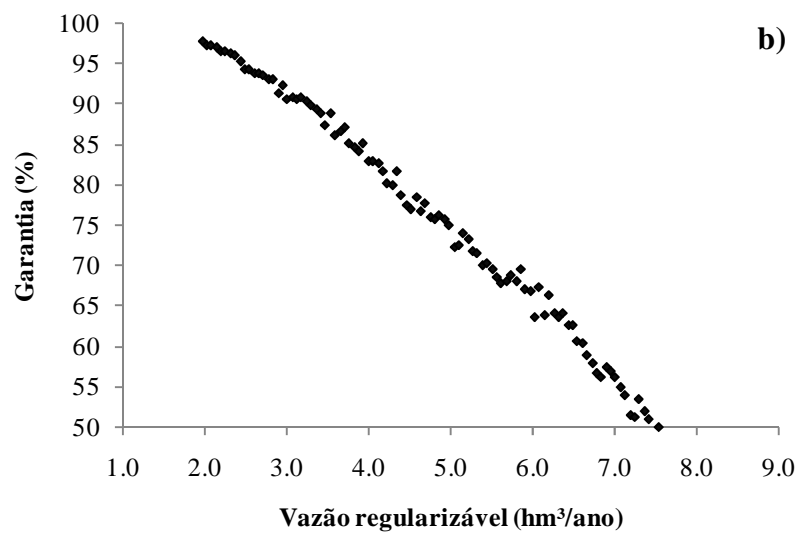
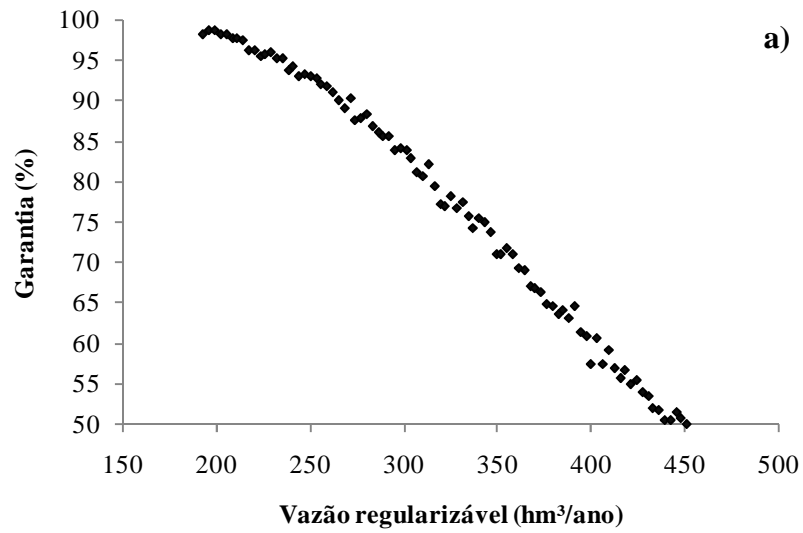


Figura 2 – Curva de garantia de vazões regularizáveis dos reservatórios Orós (a), Benguê (b) e Boqueirão (c)

Análise de sensibilidade

Para avaliar a influência de diferentes variáveis sobre a vazão regularizável com 80% de garantia, realizou-se uma análise de sensibilidade mudando-se o valor da variável e avaliando-se o impacto sobre a vazão regularizável, conforme realizado Medeiros e Araújo (2005). As variáveis analisadas foram o coeficiente de variação dos deflúvios anuais, a capacidade de armazenamento dos reservatórios e seu coeficiente de forma (α), cujos resultados são apresentados nas Figuras 3a, 3b e 3c, respectivamente.

Observa-se que o coeficiente de variação dos deflúvios anuais é a variável mais sensível entre as três analisadas, seguida da capacidade de armazenamento e do coeficiente de forma dos reservatórios, este último apresentando o menor impacto sobre a vazão regularizável. Isso indica a forte influência do regime de vazões sobre a disponibilidade hídrica. Os deflúvios médios anuais afluentes aos reservatórios apresentam coeficientes de variação muito elevados, de 0,84 a 1,36, e qualquer aumento dessa variabilidade pode reduzir significativamente as vazões regularizadas, especialmente na pequena escala, como indica a Figura 3a.

No que diz respeito à escala, observa-se que para todas as variáveis, a sensibilidade diminui com o aumento da escala. Para o reservatório Boqueirão, com capacidade de 0,06 hm³, qualquer variação superior a 10% nas variáveis analisadas provoca alterações na vazão Q_{80} superiores a 50%. Em contrapartida, variações de mais de 50% nas variáveis do açude Orós, praticamente não alteram a vazão regularizada por esse reservatório com 80% de garantia. Isso demonstra a menor susceptibilidade das vazões regularizadas por grandes reservatórios a alterações nos regimes de vazão e características físicas dos mesmos.

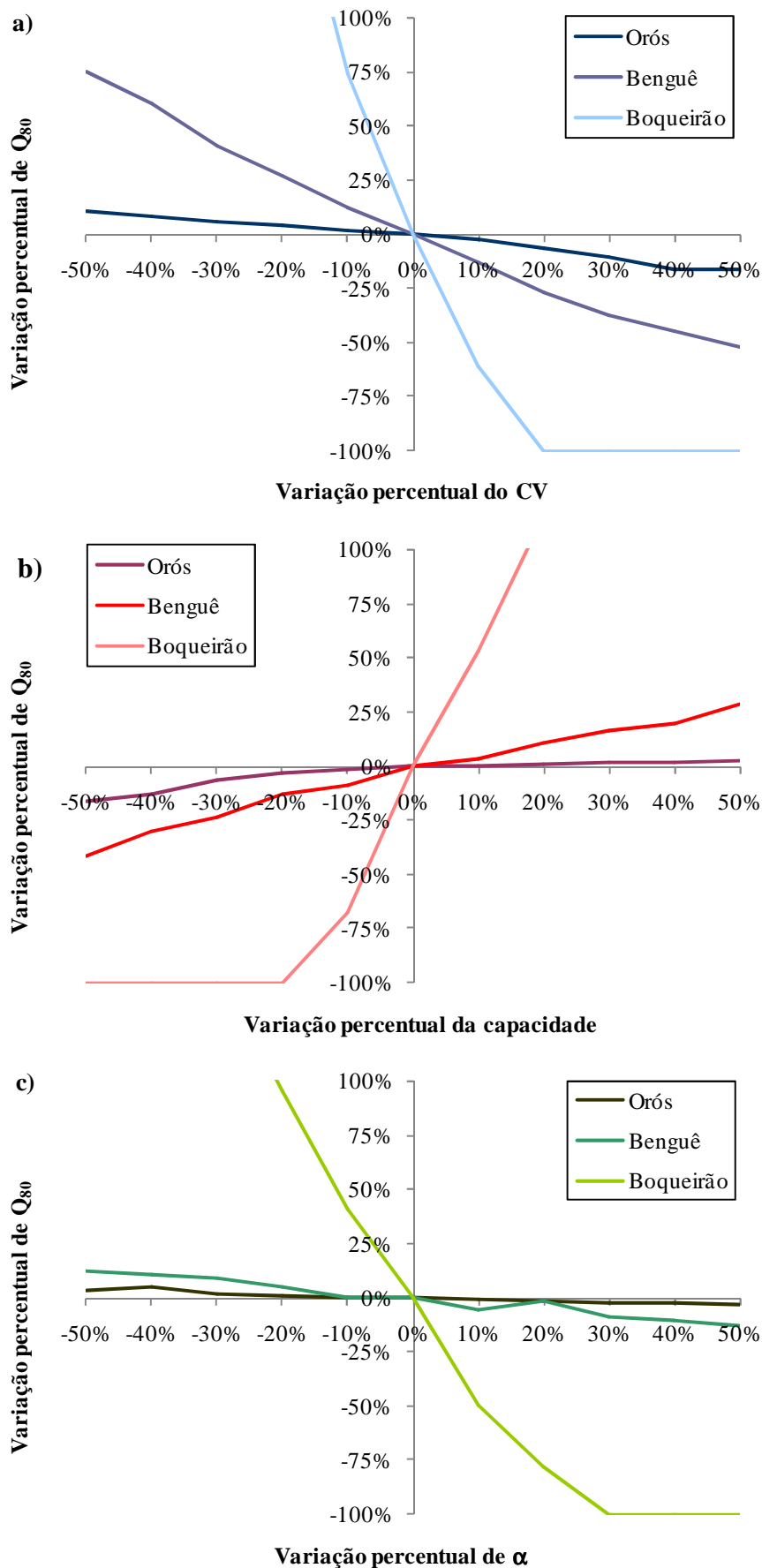


Figura 3 – Análise de sensibilidade das vazões regularizáveis com 80% de garantia dos reservatórios Orós, Benguê e Boqueirão, a variações no CV dos deflúvios anuais (a), na capacidade de armazenamento (b) e no coeficiente de forma (c)

CONCLUSÕES

As simulações de operação de reservatórios realizadas neste trabalho utilizando o modelo VYELAS, indicaram um aumento de vazão regularizável específica com o aumento da escala: vazões Q_{80} de 12.480, 4.609 e 250 $m^3/km^2/ano$ para os açudes Orós (capacidade de 1.940 hm^3), Benguê (19,6 hm^3) e Boqueirão (0,06 hm^3), respectivamente. Isso demonstra um aumento da eficiência hidrológica de reservatórios com o aumento da escala.

Na análise de sensibilidade das vazões regularizáveis, constatou-se que das três variáveis analisadas, quais sejam o coeficiente de variação dos deflúvios anuais, a capacidade de armazenamento e o fator de forma dos reservatórios, a primeira apresentou maior sensibilidade. Constatou-se, com isso, a forte influência do regime de vazões sobre a disponibilidade hídrica. Quanto à escala do reservatório, observou-se que a sensibilidade diminui com o aumento da escala, demonstrando a menor susceptibilidade das vazões regularizadas por grandes reservatórios às alterações nos regimes de vazão e características físicas dos mesmos, confirmando seu papel estratégico na disponibilidade hídrica de regiões semiáridas.

AGRADECIMENTOS

Os autores são gratos à CAPES por concessão de bolsas de doutorado ao primeiro e terceiro autores. Agradecimento também ao CNPq pelo financiamento do Projeto CONECTE (processo 471101/2007-9, Edital Universal).

BIBLIOGRAFIA

ANA (2009). “*Sistema de Informações Hidrológicas – HIDROWEB*”. Agência Nacional de Águas. <http://hidroweb.ana.gov.br/>, acesso em maio de 2009.

ARAÚJO, J.C.; PIEDRA, J.I.G. (2009). “*Comparative hydrology: analysis of a semiarid and a humid tropical watershed*”. *Hydrological Processes*, 23(8), 1169-1178.

ARAÚJO, J.C.; MEDEIROS, P.H.A. (2008). “*Water availability reduction in reservoirs for different sediment yield scenarios in a semi-arid watershed*”. 13th IWRA World Water Congress, Montpellier, França.

ARAÚJO, J.C.; GÜNTNER, A.; BRONSTERT, A. (2006). “*Loss of reservoir volume by sediment deposition and its impact on water availability in semiarid Brazil*”. *Hydrological Sciences Journal*, 51(1), 157-170.

ARAÚJO, J.C.; BRONSTERT, A.; GÜNTNER, A. (2005). “*Influence of reservoir sedimentation on water yield in the semiarid region of Brazil*”, in VIIth IAHS Scientific Assembly, Foz do Iguaçu. *Sediment Budgets*, IAHS Publication 292. Wallingford: IAHS, v. 2, 301-307.

ARAÚJO, J.C.; FERNANDES, L.; MACHADO JÚNIOR, J.C.; LIMA OLIVEIRA, M.R.; CUNHA SOUSA, T. (2003). “*Sedimentation of reservoirs in semiarid Brazil*”, in *Global change and*

regional impacts: Water availability and vulnerability of ecosystems and society in the semi-arid Northeast of Brazil (org. T. Gaiser, M.S. Krol, H. Frischkorn & J.C. de Araújo), Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 205-216.

CAMPOS, J.N.B.; SOUZA FILHO, F.A.; ARAÚJO, J.C. (1997). “*Incertezas na regularização de vazões*”. XII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Vitória, ES.

CAMPOS, J.N.B. (1996). “*Dimensionamento de reservatórios: o método do diagrama triangular de regularização*”. Edições UFC, Fortaleza, CE.

CEARÁ (2005). “*Plano Estadual de Recursos Hídricos do Estado do Ceará - REVISÃO*”. CD-ROM, Secretaria de Recursos Hídricos, Ceará.

COSTA, A.C. (2007). “*Hidrologia de uma bacia experimental em Caatinga conservada no semi-árido Brasileiro*”. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, UFC, Fortaleza-CE.

HIDROSED (2009). “*Banco de dados hidrossedimentológico*”. Grupo de Estudos Hidrossedimentológicos do Semiárido. www.hidroсед.ufc.br, acesso em maio de 2009.

INMET (1992). “*Normais Climatológicas (1961 – 1990)*”. – Instituto Nacional de Meteorologia, Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Brasília-DF.

MAMEDE, G.L. (2008). “*Reservoir sedimentation in dryland catchments: modelling and management*”. Tese de doutorado, Instituto de Geoecologia, Universidade de Potsdam, Alemanha.

MEDEIROS, R.M. (2008). “*Balanço hídrico e sedimentológico de reservatório de médio porte: o caso do Benguê, Ce*”. Relatório de iniciação científica, UFC, Fortaleza, CE.

MEDEIROS, P.H.A.; ARAÚJO, J.C. (2005). “*Modelagem da interceptação no semi-árido brasileiro: aplicação do modelo de Gash na Bacia Experimental de Aiuaba – CE*”. XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, João Pessoa, PB.

SOULSBY, C.; RODGERS, P.J.; PETRY, J.; HANNAH, D.M.; MALCOLM, I.A.; DUNN, S.M. (2004). “*Using tracers to upscale flow path understanding in mesoscale mountainous catchments: two examples from Scotland*”. *Journal of Hydrology*, 291, 174-196.

VAN OEL, P.R.; KROL, M.S.; HOEKSTRA, A.Y.; ARAÚJO J.C. (2008). “*The impact of upstream water abstractions on reservoir yield: the case of the Orós Reservoir in Brazil*”. *Hydrological Sciences Journal*, 53(4), 857-867.