

Contribuições ao Debate Sobre as Eficiências de Pequenos e Grandes Reservatórios

José Nilson B. Campos, Ticiana M. de Carvalho Studart,

David Duarte G. Martinz e Luiz Sérgio V. Nascimento

Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental - Universidade Federal do Ceará - Campus do Pici - Bloco 713
60451-970 Fortaleza, CE - Fone (85) 288-9623 - Fax 288-9627 - nilson@ufc.br, ticiana@ufc.br

Recebido: 01/02 - revisão: 09/02 - aceito: 04/03

RESUMO

O presente trabalho visa analisar, conceitual e empiricamente, a questão da eficiência de pequenos e grandes reservatórios. No enfoque conceitual, a análise é procedida através da equação adimensional do balanço hídrico do método do Diagrama Triangular de Regularização. No lado empírico, analisaram-se os reservatórios constantes no cadastro do Plano de Gerenciamento das Águas da Bacia do Rio Jaguaribe, desenvolvido pela Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Ceará (COGERH). Os reservatórios foram agrupados por classes de capacidade e estudados através de seus volumes regularizados, sangrados e evaporados. Admitiu-se, com objetivo de homogeneidade, para todos os reservatórios, uma capacidade hipotética igual a uma vez o volume médio afluente anual, o que resultou em volumes de sangria bem acima dos valores reais. Constatou-se que há uma tendência de crescimento das eficiências hídricas dos grandes reservatórios que obedecem a uma equação $0,2106 \mu^{0,0724}$ (sendo μ o desflúvio médio anual). Para que o reservatório menos eficiente se tornasse tão eficiente quanto o mais eficiente, observou-se que seria necessário que se reduzisse a lâmina de evaporação menos eficiente em 13 vezes.

Palavras-chave: pequenos e grandes reservatórios.

INTRODUÇÃO

Em uma grande porção do Nordeste brasileiro, a construção de reservatórios superficiais é condição essencial à obtenção de suprimentos de água confiáveis. Por essa razão, a ocupação dos sertões nordestinos se deu concomitantemente à implementação da política de açudagem, inserida na política de combate às secas.

As altas taxas de evaporação e as irregularidades das vazões naturais dos rios interferem significativamente nas eficiências dos reservatórios superficiais da Região. Assim, diante das necessidades e das adversidades climáticas, a busca por reservatórios mais eficientes torna-se um desafio constante para os profissionais que trabalham com o planejamento de recursos hídricos.

Na busca de uma política ótima, surgiu, já no século XIX, um interessante debate: o que seria melhor para a Região, os grandes ou os pequenos açudes?

A análise do conceito do que é “melhor” certamente depende do ponto de vista. Para situações distintas as respostas podem ser diferentes. Há situações onde o pequeno reservatório pode atender melhor o objetivo de planejamento e, por outro lado, há também situações nas quais o grande reservatório se mostra mais apropriado.

Caminhando-se em direção ao caso específico da eficiência hidrológica dos reservatórios, pode-se reformular a questão anterior para a seguinte: visto em conjunto, quais

reservatórios são mais eficientes: os pequenos ou os grandes?

Nesse debate, os defensores da pequena açudagem argumentam que os grandes reservatórios, por possuírem maiores áreas expostas para evaporação, são menos eficientes que os pequenos açudes. No lado oposto, defensores da grande açudagem argumentam que os grandes açudes, por possuírem maiores profundidades médias, são os mais eficientes.

O presente artigo visa responder essa questão quantitativamente, a partir de análises estatísticas de uma amostra de 40 reservatórios do vale do Jaguaribe no Ceará. Para fins de homogeneidade na comparação dos resultados, foram atribuídos aos reservatórios tamanhos diferentes dos seus tamanhos reais. Assim, todos reservatórios foram simulados com uma capacidade hipotética igual a seus respectivos volumes afluentes médios anuais. Esse artifício levou a um aparente excesso de volume de sangria dos reservatórios quando comparados às condições reais.

O comportamento hidrológico de cada reservatório foi avaliado com a utilização da metodologia do Diagrama Triangular de Regularização (Campos, 1996).

Para a verificação, em conjunto, da eficiência hidrológica, em conjunto, os reservatórios foram agrupados em classes de capacidades. Para cada classe de capacidade foram analisadas as eficiências hidrológicas, as perdas por evaporação e as perdas por extravasamento pelo vertedouro.

Os resultados corroboraram com estudos anteriores do autor principal e de outros autores indicando que, em média, os grandes reservatórios são mais eficientes que os pequenos reservatórios. Adicionalmente, foram também estabelecidas equações de regressão relacionando as capacidades dos reservatórios às suas eficiências hidrológicas (capacidade de regularização) e às perdas por evaporação.

METODOLOGIA

A metodologia empregada no presente estudo é apresentada em duas seções. Primeiramente discorre-se, resumidamente, sobre a base conceitual do Diagrama Triangular de Regularização e como o mesmo foi aplicado na pesquisa. Em seguida apresenta-se a análise estatística adotada para a obtenção dos resultados.

O Diagrama Triangular de Regularização

O Diagrama Triangular de Regularização (DTR) foi desenvolvido resolvendo a equação adimensional do balanço hídrico, na forma proposta por Campos (1987). Na solução da referida equação foi utilizada a simulação Monte Carlo, com o uso de séries sintéticas de 2.000 anos de extensão para reproduzir as condições de estado de equilíbrio.

A equação adimensional do balanço hídrico - No método do DTR adotaram-se as hipóteses do modelo mutuamente exclusivo (Moran, 1954), apropriado para análises de longo horizonte (planejamento) de reservatórios em rios intermitentes. As hipóteses são:

- o ano é dividido em duas estações - a úmida e a seca;
- os deflúvios e as sangrias ocorrem somente durante a estação úmida;
- a evaporação e as retiradas ocorrem simultaneamente e somente durante a estação seca;
- a retirada só é procedida quando o volume de água no reservatório é maior do que a reserva mínima.

O balanço hídrico de um reservatório, em unidades de volume, pode ser representado pela seguinte equação:

$$Z_{i+1} = Z_i + VA_i - VE_i - VR_i - VS_i \quad (1)$$

em que Z_i e Z_{i+1} representam os volumes acumulados no reservatório nos inícios dos períodos i e $i + 1$, respectivamente; VA_i denota o volume afluente ao reservatório durante o período i ; VE_i denota o volume evaporado do reservatório durante o período i ; VR_i representa o volume retirado do reservatório no período i e VS_i denota o volume sangrado da reserva durante o período i .

A representação matemática das curvas hipsográficas é dada por expressões exponenciais do tipo (Sperling, 1999):

$$Z(h) = ah^b \quad (2)$$

em que $Z(h)$ denota o volume acumulado no reservatório quando o nível da água se encontra a uma altura h ; h é a altura do lago medida a partir do ponto mais profundo e a e b representam coeficientes numéricos geralmente obtidos pelo método dos mínimos quadrados.

No método em análise, para manter a homogeneidade dimensional da equação, foi adotada a equação:

$$Z(h) = \alpha h^3 \quad (3)$$

sendo α um adimensional denominado de fator de forma do reservatório.

Muitos estudos têm sido desenvolvidos com vistas à determinação dos coeficientes a e b , a maioria analisando os erros cometidos nas estimativas dos volumes reais dos reservatórios, através da aproximação da equação (Molle e Cadier, 1992; Torreão, 1997). Segundo estudos de Molle e Cadier (1992), o parâmetro b varia de 2,2 a 3,2, atingindo valores fora desta faixa em apenas 20% dos casos na Região Nordeste do Brasil; o parâmetro a , por outro lado, varia bem mais fortemente, assumindo valores em torno de 200 (para vales encaixados) a valores superiores a 30.000 (para grandes reservatórios).

Campos, Nascimento e Studart (2001) buscaram uma abordagem diferente para a análise dos parâmetros a e b . Os autores analisaram os erros cometidos nas estimativas das vazões regularizadas, decorrentes da substituição da tabela cota *versus* volume por equações matemáticas. Foram estudadas as Equações (2) e (3). Os autores concluíram que não existe viés nas estimativas das vazões regularizadas ao utilizar-se qualquer uma das equações. Concluíram também que, para 90% de garantia, as médias dos módulos dos erros variavam de 5,29% para a Equação (2), a 5,38% para a Equação (3). Assim, não há diferenças estatísticas entre os usos das Equações (2) e (3). A equação mais simples, Equação (3), é tão eficiente quanto a Equação (2).

A relação entre área e altura decorre matematicamente da derivada do volume em relação à altura:

$$A(h) = dZ(h)/dh = 3\alpha h^2 \quad (4)$$

sendo $A(h)$ é área do espelho d'água na altura h ; e α denota o fator de forma do reservatório.

Através de algumas operações algébricas, Campos (1987) obteve a equação adimensional do balanço hídrico na forma da Equação (5):

$$\frac{Z_{t+1}}{\mu} = \frac{Z_t}{\mu} + \frac{VA_t}{\mu} - \frac{(3a^{1/3} E)}{(\mu^{1/3})} - \frac{VR_t}{\mu} - \frac{VS_t}{\mu} \quad (5)$$

sendo E a lâmina média anual evaporada pelo reservatório; μ o deflúvio médio anual afluente ao reservatório; e VA_i , VR_i e VS_i , já definidos anteriormente, o volume afluente ao reservatório no ano i ; o volume retirado do reservatório no ano i e o volume sangrado do reservatório no ano i , respectivamente. O valor de VR_i é igual ao volume anual regularizado (M) quando houver disponibilidade no reservatório e igual ao volume disponível quando o volume armazenado for insuficiente para atender ao volume regularizado.

Na formulação de um processo gráfico de dimensionamento de reservatórios, Campos (1987) parametrizou a Equação (5) na forma:

$$f_M = \varphi(f_K, f_E, CV, G) \quad (6)$$

sendo f_M o fator adimensional de retirada (M/μ); f_K o fator adimensional de capacidade (K/μ); f_E o fator adimensional de evaporação calculado pela relação $(3\alpha^{1/3} E_v)/\mu^{1/3}$; CV o coeficiente de variação dos deflúvios anuais e G a garantia no fornecimento do volume regularizado.

Posteriormente, usando a mesma parametrização e simulação Monte Carlo, Campos (1996) formulou o método do Diagrama Triangular de Regularização (DTR) para análise e dimensionamento de reservatórios (Figura 1).

O DTR, desenvolvido para uma garantia anual de 90% e coeficientes de variação entre 0,6 e 1,6, permite obter graficamente, como porcentagem do deflúvio anual (μ), os valores esperados dos volumes efetivamente retirados (%VR), sangrados (%VS) e evaporados (%VE).

O volume anual regularizado pelo reservatório com 90% de garantia anual pode ser obtido em função de %VR pela Equação (7):

$$M_{90} = 1,0526 (\%VR/100) \mu \quad (7)$$

em que M_{90} representa o volume anual regularizado com 90% de garantia; %VR a parte do deflúvio médio anual (μ) efetivamente retirada para regularização e 1,0526 é o fator para compensar os anos nos quais a retirada efetiva VR_i é menor do M_{90} (Campos, 1996).

A lógica do fator adimensional de evaporação - Sejam dois reservatórios com mesma forma (α) e com capacidades iguais aos seus respectivos deflúvios médios anuais (ou seja, $f_K = 1$). Sendo assim, o reservatório que recebe um deflúvio maior (reservatório 1) terá uma capacidade de acumulação maior que aquele que recebe menor deflúvio (reservatório 2). Se, de ambos reservatórios, for extraída uma mesma lâmina de evaporação (E), fica evidente pela Figura 2 que o percentual que resta para regularizar é maior no maior reservatório.

O fator adimensional de evaporação, como mostrado por Campos (1987), tem base analítica dentro da hipótese do açude descrito pela Equação (3). O f_E agrupa três gran-

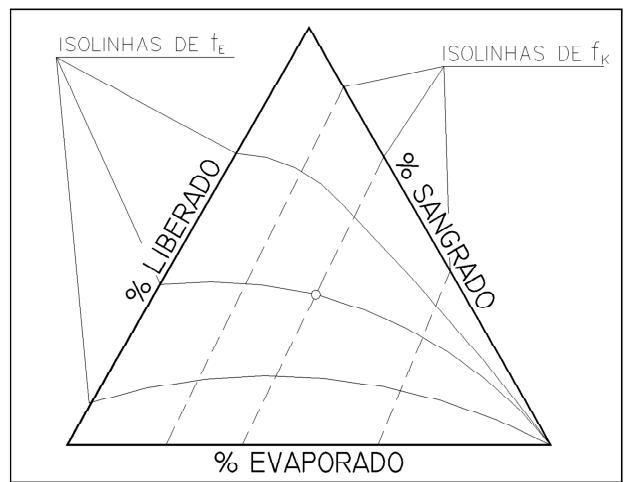


Figura 1. Representação esquemática do Diagrama Triangular de Regularização (Campos, 1996).

dezas que influem diretamente na eficiência de um reservatório. São elas:

A forma do reservatório (α) - quanto maior α , mais aberto e menos eficiente é o reservatório. Esta grandeza entra no fator de evaporação com expoente igual a 1/3.

A lâmina de evaporação do lago (E) - quanto maior a evaporação maior o fator de evaporação e menor a eficiência do reservatório. Esta grandeza entra no numerador do f_E com expoente igual a 1 (um), sendo, portanto, o de maior peso.

O deflúvio médio anual (μ) - Esta grandeza entra no denominador de f_E com expoente igual a 1/3. Essa grandeza insere no fator de evaporação o atributo do reservatório se manter uma altura média efetiva mais elevada. De nada adiantaria um reservatório ter uma forma apropriada (grande profundidade) se o deflúvio afluente ao mesmo for pequeno e o mantivesse sempre com uma baixa profundidade.

É razoável admitir que os maiores reservatórios tenham vales mais abertos e, portanto, maiores valores de α , tendendo a apresentar, consequentemente, maiores valores de f_E . Por outro lado, os maiores reservatórios têm maiores valores de μ , os quais, por sua vez, tendem a diminuir o valor de f_E . Dessa forma, para estudar como esses dois fatores opostos se contrabalançam, procedeu-se ao estudo estatístico apresentado a seguir.

O procedimento estatístico

O procedimento estatístico adotado no presente trabalho constou das seguintes fases: 1) formação de uma amostra de reservatórios, 2) separação dos reservatórios em classes, em função da capacidade, 3) estudo das relações entre capacidades, eficiências hidrológicas, fatores de evaporação, perdas por evaporação e perdas por sangria.

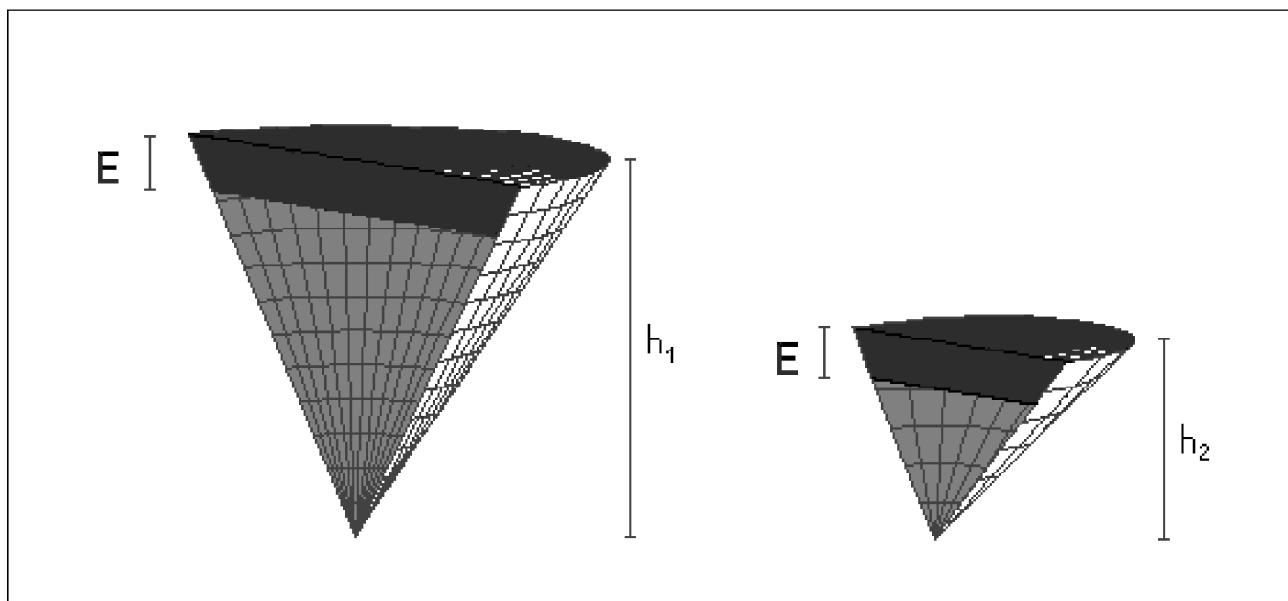


Figura 2. Representação esquemática de volumes evaporados de reservatórios com mesma forma (α), mesma lâmina evaporada (E) e diferentes capacidades.

Seleção da amostra - A amostra analisada foi formada por 40 reservatórios da bacia do rio Jaguaribe no Estado do Ceará (Tabela 1). A limitação da amostra a essa bacia foi motivada pela recente conclusão do Plano de Gerenciamento de Águas (COGERH, 1999) da referida bacia, que tornou disponível o acervo de dados hidrológicos necessários. Ademais, a bacia do Jaguaribe é bastante representativa do Semi-Árido, no que se refere à morfologia dos açudes; posteriormente, pretende-se aplicar a metodologia aqui desenvolvida a outras bacias do Nordeste.

Obtenção dos dados hidrológicos e morfométricos

- Para os objetivos do presente estudo utilizaram-se os seguintes dados:

Dados relativos às capacidades - O fator adimensional de capacidade, como pode ser visualizado no Diagrama Triangular de Regularização, influencia substancialmente o rendimento de um reservatório. Assim, para dar maior homogeneidade à análise, optou-se por admitir, para todos os reservatórios estudados, uma capacidade de acumulação igual a uma vez o volume afluente médio anual (ou seja, $f_K = 1$). Esta suposição retira da amostra ruídos que poderiam ser introduzidos pela tendência dos executores da política de açudagem de dimensionarem os açudes de rios mais caudalosos com maiores valores dos fatores adimensionais de capacidade.

Volumes afluentes médios anuais - Os valores dos deflúvios médios anuais foram obtidos do Plano de Gerenciamento de Águas da Jaguaribe.

Os valores da evaporação - Os valores de E, evaporação no lago durante a estação seca, foram calculados a par-

tir dos dados das Normais Climatológicas (INEMET, 1992). Como os dados referem-se a medidas pelo evaporímetro Piché, efetuou-se a correção proposta por Coelho (2000), transformando-os em valores equivalentes à evaporação no Tanque Classe A.

Em seguida aplicaram-se os fatores de correção do tanque (K_A) propostos por Molle e Cadier (1992), em função da área do reservatório. Para os reservatórios com áreas superiores a 50 hectares aplicou-se K_A igual a 0,70. Para o açude Gomes, único reservatório com área do lago inferior 50 hectares, adotou-se K_A igual a 0,75.

O fator de forma - Os valores dos fatores de forma dos reservatórios foram obtidos através da relação $\alpha = K/h^3$, onde K é a capacidade do reservatório e h, a altura da superfície d'água correspondente à capacidade. Em estudo recente (Campos, Nascimento e Studart, op. cit.) mostraram que essa aproximação é suficientemente precisa para estimativa das vazões regularizadas.

Divisão dos reservatórios em classes - Para proceder à análise estatística, os reservatórios foram agrupados em classes segundo suas capacidades fictícias (iguais aos seus respectivos volumes afluentes médios anuais). Procurou-se manter um mínimo de 5 reservatórios em cada classe. Porém, devido à pequena quantidade de reservatórios com capacidade entre 200 e 1200 hm^3 , admitiu-se para a última classe um total de quatro reservatórios.

Considerando que os açudes Orós e Banabuiú apresentam deflúvios afluentes acentuadamente maiores que os demais, procedeu-se a uma outra análise retirando esses dois reservatórios da amostra e agrupando os dois restantes na classe imediatamente inferior.

Tabela 1. Características dos 40 reservatórios da bacia do Jaguaripe analisados no estudo.

Açude	K (hm ³)	α	μ (hm ³ /ano)	E (m)	f_E
Atalho II	108,25	2.524,78	97,78	1,02	0,09
Banabuiú	1.800,00	10.529,16	768,42	0,97	0,07
Boa Viagem	47,00	3.008,00	28,88	0,97	0,14
Broco	17,50	6.377,55	4,59	1,07	0,36
Canaístula	13,12	9.857,25	5,91	1,00	0,36
Canoas	69,25	870,99	19,31	1,08	0,12
Cedro	126,00	37.333,33	25,84	0,95	0,32
Cipoada	17,30	12.997,75	32,25	1,00	0,22
Ema	10,40	5.324,80	9,65	1,00	0,25
Favelas	30,10	10.969,39	32,38	1,07	0,22
Fogareiro	118,81	5.025,82	267,85	0,97	0,08
Gomes	2,39	121,42	48,61	1,10	0,04
Ingazeiro	11,32	2.763,67	11,57	1,02	0,19
Joaquim Távora	23,66	8.622,45	7,40	0,95	0,30
Lima Campos	63,65	34.204,49	24,78	0,95	0,32
Nobre	22,09	10.054,62	1,68	0,97	0,53
Nova Floresta	7,62	2.007,16	118,84	0,95	0,07
Olho d'água	21,30	1.792,39	5,49	0,95	0,20
Orós	1.956,30	37.097,24	1.042,36	0,95	0,09
Patu	71,80	2.659,26	73,42	0,97	0,10
Pedras Brancas	434,00	22.049,48	157,21	0,97	0,15
Poço da Pedra	50,00	4.695,72	46,09	1,08	0,15
Poço de Barro	52,00	15.407,41	29,57	1,00	0,24
Prazeres	32,50	338,29	6,18	1,02	0,12
Quixabinha	32,41	1.476,40	3,29	1,02	0,24
Quixeramobim	54,00	14.501,02	354,36	0,97	0,10
R. dos Carneiros	37,18	945,96	3,61	1,02	0,20
Riacho do Sangue	61,42	12.501,53	77,54	0,97	0,16
Riacho dos Tanques	12,78	7.395,83	2,99	0,97	0,39
Riacho Verde	14,67	2.985,96	1,83	0,97	0,34
Rivaldo de Carvalho	6,42	14.858,32	12,47	1,07	0,34
Santo Antônio de Russas	29,70	29.700,00	93,32	1,00	0,21
São José II	29,15	5.933,24	14,00	0,95	0,22
Serafim Dias	43,00	39.929,77	101,39	1,07	0,24
Thomas Osterne	28,79	1.842,56	5,64	1,02	0,21
Trapiá II	18,19	1.315,83	14,44	0,97	0,13
Trici	16,50	3.673,09	25,39	1,07	0,17
Trussu	263,00	7.661,36	73,74	0,95	0,13
Várzea do Boi	51,80	23.577,61	44,38	1,07	0,26
Vinícius Berredo	434,05	22.052,02	158,50	0,97	0,15

Fonte: COGERH (1999); Obs.: os elevados valores da sangria dos reservatórios decorrem da suposição de reservatórios com capacidade igual ao volume afluente médio anual. Na realidade, como os reservatórios, em sua maioria, têm capacidade maior, o verdadeiro volume de sangria é bem menor.

Tabela 2. Divisão da amostra em classes (incluindo Orós e Banabuiú).

Limites da classe (hm ³)	Número de reservatório na classe
0 - 10	12
10 - 20	5
20 - 30	5
30 - 50	5
50 - 100	5
100 - 200	5
200 - 1200	4

RESULTADOS

A análise dos resultados foi procedida sob dois enfoques. O primeiro diz respeito às relações existentes entre o fator adimensional de evaporação e a capacidade do reservatório. O segundo refere-se à avaliação das relações entre as eficiências dos reservatórios e seus respectivos volumes afluentes.

A influência do fator adimensional de evaporação

O efeito da evaporação no rendimento de um reservatório é função direta do fator adimensional de evaporação. Reservatórios com menores valores de f_E apresentam maiores eficiências. A presença do termo $\mu^{1/3}$ no denominador de f_E indica que rios caudalosos tendem a apresentar menores valores para f_E .

Por outro lado, esses rios necessitam, para uma mesma capacidade adimensional (mesmo f_K), um maior volume de acumulação. Nesse contexto, pode-se esperar, via de regra, que as águas devam ser acumuladas em vales mais abertos, resultando em maiores valores do fator de forma (α). Como o fator $\alpha^{1/3}$ está no numerador de f_E , é de se esperar uma tendência de aumento do deste fator dimensional.

Assim, para verificar como essas duas tendências se contrabalançam, procedeu-se a análise estatística através de estudos de regressões, utilizando-se a amostra de modo não estratificado.

Estudaram-se as correlações entre f_E e μ para a amostra. O melhor ajuste foi obtido, com um coeficiente de determinação (r^2) igual a 0,48, com a equação $f_E = 0,397 \mu^{0,24}$ (Figura 3).

Observou-se uma tendência de valores mais elevados de f_E nos reservatórios de menores capacidades. Pode-se então concluir que, em geral, os maiores reservatórios tendem a ser mais eficientes que os menores.

A tendência corrobora com as conclusões de estudo anterior, com uma outra amostra (Campos, 1996), corrobora também com a tese defendida por muitos hidrólogos que os grandes reservatórios são mais eficientes que os pequenos.

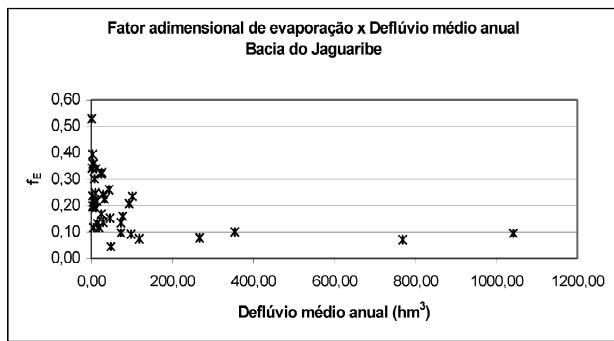


Figura 3. Pares de valores do fator adimensional de evaporação (f_E) versus deflúvio médio afluente anual (μ) para os 40 açudes analisados na Bacia do Jaguaribe.

Observando-se as dispersões dos pontos da Figura 3, nota-se uma grande dispersão nos valores de μ menores de 100. Isto significa que, na natureza, nas partes mais próximas às cabeceiras, encontram-se tanto vales abertos (valores elevados de α) quanto vales fechados (baixos valores de α). Todavia, no balanço total dos açudes, há uma predominância de elevados fatores de evaporação. Assim, a política de açudagem adotada no século passado parece não ter sido muito seletiva no que se refere à escolha dos locais dos pequenos açudes.

No entanto, para os grandes reservatórios (grandes bacias de drenagem), pode-se ser mais seletivo na escolha do local da barragem, vez que somente um pequeno número deles pode ser construído. Ademais, os custos envolvidos são bem mais elevados, o que implica em estudos hidrológicos mais rigorosos.

Análise das eficiências e sangrias

Utilizando-se a metodologia do DTR, obteve-se, para cada reservatório, a divisão dos deflúvios afluentes em vazão regularizada, perdas por evaporação e sangria. Os percentuais de μ regularizados, evaporados e sangrados por cada reservatório são os expostos na Tabela 3.

Para a presente análise, dividiu-se os reservatórios em classes, em função do volume médio afluente anual (μ). Os percentuais de μ regularizado, evaporado e sangrado, considerando-se o ponto médio de cada classe, são os observados na Tabela 4. Observa-se claramente que, em média, os grandes reservatórios são mais eficientes que os pequenos.

Os pequenos reservatórios (aqueles com μ até 10 hm^3/ano) regularizam, em média, 23% de μ e evaporam 18% de μ . Os grandes reservatórios (com μ entre 200 e 1.200 hm^3/ano) têm um desempenho muito melhor; em termos médios, regularizam 33% de μ e evaporam apenas 7% de μ (Tabela 4 e Figura 4).

As relações entre percentual liberado *versus* deflúvio médio afluente anual (μ) e percentual evaporado *versus*

Tabela 3. Percentuais regularizado, evaporado e sangrado, dos 40 reservatórios analisados simulados com a capacidade hipotética igual a uma vez o volume afluente anual e um coeficiente de variação igual a 1,2.

Açude	% Regularizado %VR	% Evaporado %VE	% Sangrado %VS
Atalho II	32,32	7,07	60,62
Bananuiú	33,51	5,66	60,83
Boa Viagem	29,81	10,04	60,15
Broco	18,67	23,45	57,88
Canafistula	18,68	23,43	57,89
Canoas	30,94	8,70	60,36
Cedro	20,26	21,51	58,23
Cipoada	25,29	15,43	59,28
Ema	24,04	16,93	59,03
Favelas	25,25	15,48	59,27
Fogareiro	33,08	6,17	60,76
Gomes	34,91	4,00	61,08
Ingazeiro	26,94	13,46	59,60
Joaquim Távora	21,34	20,20	58,46
Lima Campos	20,49	21,23	58,28
Nobre	11,18	32,72	56,11
Nova Floresta	33,28	5,93	60,79
Olho d'água	26,59	13,88	59,53
Orós	32,12	7,29	60,58
Patu	32,03	7,41	60,56
Pedras Brancas	29,04	10,95	60,01
Poço da Pedra	28,98	11,02	60,00
Poço de Barro	24,28	16,65	59,07
Prazeres	30,89	8,75	60,36
Quixabinha	24,64	16,21	59,15
Quixeramobim	31,80	7,67	60,52
R. dos Carneiros	26,63	13,83	59,54
Riacho do Sangue	28,66	11,41	59,94
Riacho dos Tanques	17,04	25,44	57,52
Riacho Verde	19,41	22,55	58,05
Rivaldo de Carvalho	19,51	22,42	58,07
Santo Antônio de Russas	26,16	14,39	59,45
São José II	25,66	14,99	59,35
Serafim Dias	24,66	16,19	59,15
Thomas Osterne	25,85	14,76	59,39
Trapiá II	30,13	9,66	60,21
Trici	28,12	12,05	59,83
Trussu	29,91	9,92	60,17
Várzea do Boi	23,42	17,68	58,90
Vinícius Berredo	29,06	10,92	60,01

Tabela 4. Percentuais regularizado, evaporado e sangrado de cada classe de açude.

Classe (hm ³ /ano)	Ponto médio da classe	% Regularizado (%VR)	% Evaporado (%VE)	% Sangrado (%VS)
0 - 10	5	23	18	59
10 - 20	15	27	13	60
20 - 30	25	25	16	59
40 - 50	45	28	12	60
50 - 100	75	30	10	60
100 - 200	150	31	9	60
200 - 1200	700	33	7	61

deflúvio médio afluente anual (μ) mostradas na Figura 4 são descritas pelas Equações (8) e (9):

$$\%VR = 0,209\mu^{0,074} \quad (8)$$

$$\%VE = 0,266\mu^{-0,214} \quad (9)$$

Análise dos valores extremos - No conjunto de açudes estudados, o máximo valor encontrado para o fator adimensional de evaporação foi de 0,53 referente ao Açude Nobre e o mínimo foi de 0,04 para o açude Gomes. Assim, para que Açude Nobre evaporasse o mesmo percentual de águas que o Açude Gomes, mantidas as demais condições constantes, seria necessário que a lámina evaporada pelo Açude Nobre fosse reduzida em 13 vezes (0,53/0,04); isso significaria reduzir a lámina evaporada, durante a estação seca, dos atuais 970 mm/ano para 74 mm/ano.

Para complementar essa análise, comparou-se a eficiência entre os extremos de deflúvio médio anual: novamente o Açude Nobre, com μ igual a 1,68 hm³/ano e o Açude Orós, com μ igual a 1.042,36 hm³/ano (seiscentas e vinte vezes maior).

Observa-se que, caso os dois reservatórios tivessem sido construídos com capacidades iguais aos seus respectivos deflúvios médios anuais ($f_K = 1$) e seus deflúvios anuais tivessem coeficiente de variação $CV = 1,2$ (hipóteses assumidas para a construção da Tabela 3), as transferências de água, com f_E 's tão diferentes (0,53 para o Açude Nobre e 0,09 para o Açude Orós) se dariam apenas entre regularização e evaporação. O Açude Orós, nestas condições, seria capaz de regularizar 32% de μ e evaporaria cerca de 7% de μ . O Açude Nobre, por sua vez, seria capaz de regularizar apenas 11% de μ e evaporaria cerca de 33% de μ . Em ambos os reservatórios os percentuais sangrados seriam em torno de 60% de μ .

CONCLUSÕES

O fator adimensional de evaporação (f_E) é um excelente indicador da eficiência de regularização de um reser-

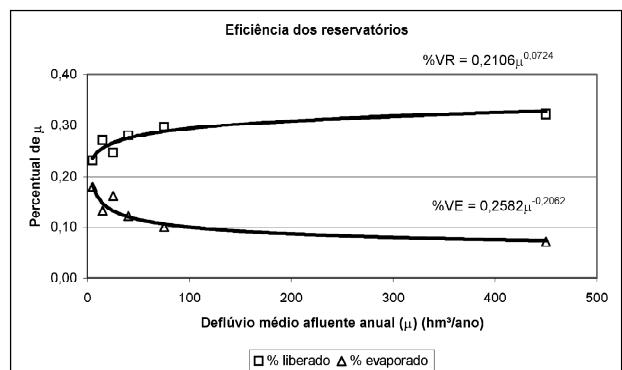


Figura 4. Percentuais regularizado (%VR) e evaporado (%VE) de cada classe de açude.

vatório, pois engloba três importantes fatores intervenientes no processo de evaporação: a forma do reservatório, o deflúvio médio afluente anual e a lámina evaporada durante a estação seca. Em função da combinação destes três parâmetros, a escolha adequada dos locais onde implantar os açudes pode significar um acréscimo (ou decréscimo) substancial nas perdas globais por evaporação de uma bacia hidrográfica.

Os percentuais regularizados e evaporados em cada reservatório são muito sensíveis às variações de f_E . Os percentuais sangrados, por sua vez, permanecem praticamente constantes, independentemente de f_E .

Os reservatórios em vales de maiores áreas de drenagem (grandes reservatórios) apresentam, em média, menores valores para o fator adimensional de evaporação e, consequentemente, maiores eficiências hidrológicas. Há, contudo, inúmeros pequenos reservatórios eficientes.

A escolha do local da barragem, como mostrado na análise dos casos extremos, é de capital importância para o desenvolvimento de uma política de açudagem.

Estudos complementares, ampliando a amostra para outras regiões do Nordeste serão posteriormente procedidos para aumentar e consolidar o conhecimento sobre o assunto objeto de um debate secular: a pequena e a grande açudagem.

SÍMBOLOGIA

α - Fator de forma da bacia hidráulica do reservatório.

μ - Volume afluente médio anual ao reservatório.

{X} - Valor esperado da grandeza X.

A - Área da superfície do lago.

Cv - Coeficiente de variação dos volumes afluentes anuais ao reservatório.

E - Lâmina evaporada do reservatório durante a estação seca.

f_E - fator adimensional de evaporação.

f_K - fator adimensional de capacidade.

f_M - fator adimensional de retirada.

- G - Garantia anual do fornecimento de água.
h- Altura de água no reservatório em relação ao ponto mais profundo.
K - Capacidade do reservatório.
M - Volume anual regularizado pelo reservatório.
 M_{90} - Volume anual regularizado pelo reservatório com uma garantia de 90%.
PE - Percentual do deflúvio afluente médio anual evaporado a partir do lago.
PR - Percentual do deflúvio afluente médio anual efetivamente retirado para fins de regularização.
VA - Volume afluente ao reservatório.
VE - volume evaporado do reservatório.
VR - volume efetivamente retirado do reservatório para fins utilitários.
VS - volume sangrado do reservatório.
Z - Estoque de água no reservatório.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq pelo suporte financeiro concedido através do Projeto Confabilidade dos Grandes Reservatórios do Nordeste em um Cenário de Mudanças no Clima.

REFERÊNCIAS

- CAMPOS, J. N. B. (1987). *A procedure for reservoir sizing on intermittent rivers under evaporation rate*. Tese de doutorado, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, USA.
- CAMPOS, J. N. B. (1996). *Dimensionamento de reservatórios: o método do diagrama triangular de regularização*. Edições UFC.
- CAMPOS, J. N. B.; NASCIMENTO, L. S. e STUDART, T. M. C. (2001). *Análise de erros na estimativa de vazões regularizadas por ajustamento da tabela cota x volume por equações matemáticas*. In: XXIV Congresso de Grandes Barragens, CBDB, Fortaleza, Ce.
- COÉLHO, P. P. (2000). *Cálculo das disponibilidades hídricas de pequenos açudes no estado do Ceará*. Projeto de final de curso, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE.
- COGERH (1999). *Plano de gerenciamento das águas da Bacia do Rio Jaguaribe*. Fortaleza, CE.
- INMET (1992). *Normais climatológicas (1961-1990)*. Instituto Nacional de Meteorologia. Brasília, DF.
- MOLLE, F. e CADIER, E. (1992). *Manual do pequeno açude*. SUDENE/ORSTOM, Recife, PE.
- MORAN, P. (1954). A probability theory of dams and storage system. *Australian Journal of Applied Science*, vol. 5, Australia.
- SPERLING, E. (1999). *Morfologia de lagos e represas*. DESA/UFMG, Belo Horizonte, MG.
- TORREÃO, T. R. (1997). *Erros na estimativa de volumes de reservatórios a partir de alturas e áreas máximas*. Dissertação de mestrado em Recursos Hídricos, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE.

Small and Large Dam Efficiency: A Question To Be Analyzed

ABSTRACT

The present paper analyzes the efficiency of 40 superficial reservoirs - small and large - located in the Jaguaribe River Basin, State of Ceará. The water budget equation is treated in its dimensionless form and the evaporation effect is evaluated through a parameter called evaporation dimensionless factor (f_E), which includes three main variables that interfere in reservoir efficiency: mean evaporation depth during the dry season (E), reservoir shape factor (α) and mean annual inflow (μ). It was observed that the percentage of reservoir yield and evaporation losses are very sensitive to f_E variations; the percentage of reservoir spills, otherwise, is practically constant, regardless of assumed f_E . It cannot be stated that reservoirs built in rivers with greater discharge are always more efficient; however, it can be said that there is positive trend for reservoirs built in torrential rivers to be more efficient.

Key words: *small and large dam*.