

ESTUDO COMPARATIVO DA EFICIÊNCIA HÍDRICA ENTRE GRANDES E PEQUENOS RESERVATÓRIOS PARA A REGIÃO NORDESTE*

** José Nilson Bezerra Campos

O presente trabalho estuda a influência da evaporação na eficiência de reservatórios de águas superficiais. A equação do balanço hídrico é tratada de forma adimensional e o efeito da evaporação é avaliado através de um fator adimensional que engloba três principais variáveis que, devido à esse fenômeno, interferem no rendimento do reservatório: a lâmina evaporada, a forma da bacia hidráulica e o deflúvio médio anual. O estudo comparativo entre as eficiências de pequenos e grandes reservatórios é feito através de uma correlação entre o fator adimensional de evaporação e o deflúvio médio anual.

INTRODUÇÃO

O Nordeste Brasileiro é caracterizado pela intermitência da maioria dos seus rios, por uma alta taxa de evaporação, pela presença significativa de solos cristalinos, por um baixo potencial de águas subterrâneas e por um regime pluviométrico bastante irregular. Nessas circunstâncias, a presença de reservatórios de acumulação de águas superficiais se torna uma condição essencial à sobrevivência dos habitantes da Região. Esse fato fez com que surgisse, ao longo desse espaço, um grande número de açudes de pequeno, médio e grande portes.

A alta taxa de evaporação predominante na Região reduz consideravelmente o rendimento hídrico desses reservatórios e, em conseqüência, a busca de locais que propiciem uma melhor eficiência no armazenamento das águas tem sido uma constante

preocupação nos meios técnicos. Nesse tema existe uma discussão sobre que tipo de açude é mais eficiente: o pequeno ou o grande.

O efeito da evaporação sobre os reservatórios foi avaliado através do fator adimensional de evaporação. O estudo consistiu na análise dos dados obtidos a partir de uma amostra de 67 açudes localizados no Nordeste. Foram abordados dois pontos principais: 1) o estudo da relação entre a capacidade do açude e volume médio afluente; 2) o estudo da regressão entre o fator adimensional de evaporação e o volume médio afluente.

CONCEITOS BÁSICOS

O balanço hídrico de um reservatório pode ser representado pela equação:

$$Z_{t+1} = Z_t + I_t - E - M - S_t, \text{ onde} \quad (1)$$

Z_t = volume acumulado na reserva no início do ano t ;

I_t = volume afluente à reserva durante o ano t ;

E = volume anual evaporado da reserva;

M = volume anual retirado da reserva;

* Trabalho apresentado no VIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos em Foz do Iguaçu 1989 - algumas modificações foram introduzidas no presente texto.

** Engenheiro Civil - Professor Adjunto da Universidade Federal do Ceará.

S_t = volume sangrado da reserva durante o ano t.

Para permitir um tratamento racional a essa equação é conveniente que se represente as relações cota x área e cota x volume por:

$$Z(h) = \alpha h^3, \quad (2)$$

$$A(h) = 3 \alpha h^2, \quad \text{onde:} \quad (3)$$

$Z(h)$ = volume da reserva à altura h;
 $A(h)$ = área do espelho d'água à altura h;
 h = altura da água em relação ao ponto mais profundo do lago;
 α = fator de forma do reservatório.

O volume evaporado "E" pode ser calculado pela relação:

$$E = 1/2 (A_t + A_{t+1})e \quad (4)$$

onde "e" representa a lâmina anual de evaporação a partir do espelho d'água do açude.

Colocando-se A_t em função de Z_t e α obtém-se:

$$E = (3 \alpha^{1/3}) (Z_t^{2/3} + Z_{t+1}^{2/3})/2 \quad (5)$$

Colocando-se o valor de "E" na Eq. 1, e dividindo-se todos os termos por μ tem-se:

$$Z_{t+1}/\mu = Z_t/\mu + I_t/\mu - (3 \alpha^{1/3}e)/(\mu^{1/3})(Z_t^{2/3} + Z_{t+1}^{2/3})/2 \mu^{2/3} - M/\mu - S_t/\mu. \quad (6)$$

A Eq. (6) representa a forma adimensional da equação do balanço hídrico de um reservatório e o termo $(3 \alpha^{1/3}e)/(\mu^{1/3})$ é denominado fator adimensional de evaporação (Campos, 1987)

O cálculo do rendimento dos reservatórios

O cálculo do rendimento dos reservatórios foi feito a partir do método desenvolvido por Campos (1987). Esse método, que consiste na resolução da Eq. (6) através da Teoria de Moran (1954, 1955), utiliza os seguintes adimensionais:

f_K - fator adimensional de capacidade - (K/μ) ;
 f_M - fator adimensional de retirada - (M/μ) ;
 CV - coeficiente de variação dos deflúvios anuais;
 PE - probabilidade de esvaziamento do reservatório;
 f_E - fator adimensional de evaporação.

sendo K a capacidade do reservatório e M a retirada anual para fins utilitários.

O papel da evaporação no rendimento dos reservatórios.

Pelo princípio de conservação de massas, o somatório dos volumes afluentes a um reservatório (ΣI) durante um intervalo de tempo T anos é igual a:

$$\Sigma I = \Sigma M + \Sigma E + \Sigma S + Z \quad (7)$$

onde Z = variação do volume acumulado na reserva

durante o intervalo de tempo considerado; ΣS = somatório dos volumes de sangria; ΣM = somatório dos volumes retirados.

Dividindo-se todos os termos da Eq. (7) por T e fazendo-se T tender para infinito, o termo Z/T tende a zero e têm-se:

$$\mu = M + E(E) + E(S) \quad (8)$$

onde μ = volume afluente médio anual ao reservatório; $E(E)$ = volume médio anual médio evaporado do reservatório; $E(S)$ = volume anual médio sangrado do reservatório; M retirada anual do reservatório.

O termo μ na Eq. (8) é constante e depende somente do regime hidrológico do rio formador do reservatório. Então, ao se mudar a capacidade do açude (K), ou qualquer dos parâmetros que formam a Eq. (6), o efeito será uma transferência entre os elementos do lado direito da Eq. (8). A maneira como se dá essa transferência, é o que será analisado a seguir.

RESULTADOS

Ao se incrementar o fator adimensional de capacidade de um reservatório (f_K), mantidos constantes C_V e f_E , o efeito será uma redução no volume médio de sangria $E(S)$. Esse decréscimo, $\Delta E(S)$, deve ser compensado por um acréscimo na evaporação média, $\Delta E(E)$, e um acréscimo na retirada, ΔM .

A título de ilustração traçou-se a curva fator adimensional de capacidade versus volume anual regularizado com 90% de garantia (medido como uma porcentagem do deflúvio afluente) para os casos em que $C_V = 1,0$; $\mu = 100,0$; e $f_E = 0,05$ e $0,40$ (Fig. 1). Essa curva é, teoricamente, monótona crescente e assintótica a um valor máximo. Note-se pela Fig. 1 que o volume anual regularizado tende bem mais rapidamente a um valor máximo para o caso em que $f_E = 0,30$ do que para $f_E = 0,05$.

A análise incremental, $\Delta M/\Delta K$ versus f_K , para diferentes valores de f_E , Fig. 2, mostra que, para o mesmo f_K , o ganho $\Delta M/\Delta K$ decresce quando f_E cresce; e, para o mesmo f_E , o ganho $\Delta M/\Delta K$ decresce quando f_K cresce. Observe-se, Fig. 2, que ao se incrementar a capacidade do reservatório em ΔK unidades de água o ganho em volume anual regularizado é igual á:

- 10,5% de ΔK para $f_K = 1,0$ e $f_E = 0,05$ (ponto 1);
- 6,5% de ΔK para $f_K = 1,0$ e $f_E = 0,30$ (ponto 2);
- 4,0% de ΔK para $f_K = 3,0$ e $f_E = 0,05$ (ponto 3);
- 0,1% de ΔK para $f_K = 3,0$ e $f_E = 0,30$ (ponto 1).

Pode-se concluir daí que, do ponto de vista da capacidade de regularização, os açudes com menores valores de f_E devem ser dimensionados com uma maior relação capacidade/deflúvio médio (f_K).

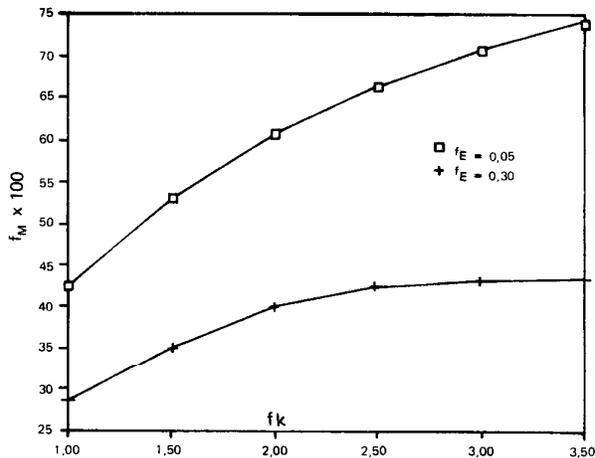


Figura 1. Curva volume regularizado com 90% de garantia versus capacidade do reservatório para $C_V = 1,0$; $\mu = 100$; e $f_E = 0,05$ e $0,40$.

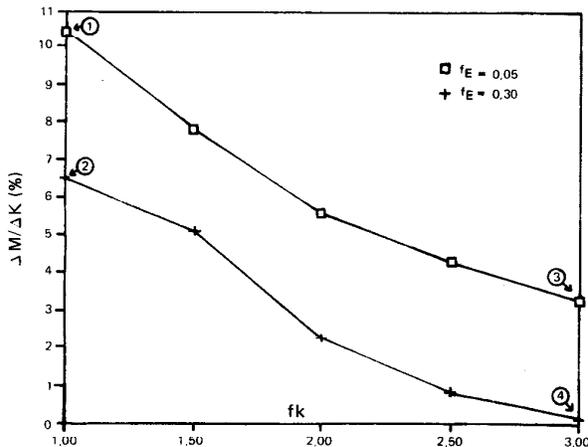


Figura 2. Curvas $\Delta M/\Delta K$ versus K para $C_V = 1,0$ e $f_E = 0,05$ e $0,40$.

O fator adimensional de evaporação

Pela análise da Eq. 4, pode-se observar que se um reservatório mantém o valor de f_E constante — independente de variações nos termos α , 'e' e μ — o percentual de águas evaporadas, para iguais valores de f_K , C_V e uma mesma retirada anual também será constante. Isso significa que um reservatório construído em um local com dois metros de evaporação pode ser tão eficiente quanto um outro construído em um local com um metro de evaporação, desde que o alto valor de 'e' seja compensado por um baixo valor de α e/ou um alto valor de μ .

A título de ilustração apresenta-se a seguir, Fig. 3, a curva de f_M (em porcentagem) versus f_E para $f_K = 2,0$ e $C_V = 0,6$; $1,0$ e $1,4$. Note-se que existe uma acentuada redução na capacidade de regularização de um reservatório com o crescimento de f_E para todos os valores de C_V .

Comparação entre grandes e pequenos e grandes reservatórios do Nordeste.

Como ficou provado, o efeito da evaporação no rendimento de um reservatório é uma função direta do fator adimensional de evaporação. Então, partindo-se dessa premissa o estudo comparativo entre os rendimentos de pequenos e grandes reservatórios foi feito através da comparação entre seus valores de f_E .

Considerando que $f_E = (3\alpha^{1/3}E/\mu^{1/3})$ podemos afirmar que a presença do termo $\mu^{1/3}$ no denominador faz com que reservatórios construídos em rios mais caudalosos tendam a apresentar um menor valor para f_E . Por outro lado, esses rios necessitam, para um mesmo f_K , um maior volume de acumulação. Nessa situação pode-se esperar, via de regra, um maior valor para a α e, em consequência, uma tendência a aumentar o valor de f_E . Então, para verificar como essas duas tendências opostas se contrabalançam, selecionou-se 67 reservatórios do Nordeste e calculou-se os respectivos valores de f_E (Tabela 1).

Procurou-se então verificar qual a tendência do valor de f_E quando o valor de μ cresce. Para a série de açudes em análise buscou-se uma correlação entre μ e f_E . Foram verificadas as seguintes curvas;

$$\begin{aligned} f_E &= a + b\mu; \\ f_E &= a\mu^b; \\ f_E &= \exp(a + b\mu); \\ 1/f_E &= a + b\mu. \end{aligned}$$

Essas relações apresentaram um baixo coeficiente de correlação — o maior valor encontrado foi $r_2 = 0,36$ para a segunda curva ($f_E = a\mu^b$). O baixo valor de r_2 indica uma alta variabilidade dos residuais. Por outro lado, todas as curvas mostraram que existe uma tendência de f_E decrescer quando μ cresce; esse fato pode ser visualizado na Fig. 4.

Análise dos valores extremos. No conjunto de açudes estudados o máximo valor encontrado para o fator adimensional de evaporação foi de 0,67 referente ao Açude Pedregulho e o mínimo foi de 0,04 para o Açude Jucás no Vale do Jaguaribe.³ Então, para que o Pedregulho evaporasse o mesmo percentual de águas que o Jucás, mantidas as demais condições constantes, seria necessário que a lâmina evaporada pelo Pedregulho fosse reduzida em 17 vezes (0,67/0,04); isso significaria reduzir a lâmina líquida evaporada dos atuais 1480 mm/ano para 87 mm/ano.

Para complementar essa análise, calculou-se a eficiência de ambos açudes através da relação entre o volume regularizado anualmente com 90% de garantia e o volume afluente médio anual. Com a finalidade de homogeneizar os resultados admitiu-se que ambos reservatórios tinham $f_K = 2,0$ e $C_V = 1,4$ na realidade $C_V = 1,6$ para o Pedregulho e $1,4$ para o Jucás. No caso do Pedregulho obteve-se um volume regularizado igual a zero; isso significa que somente a evaporação é capaz de esvaziá-lo acima de 10% dos anos. Por outro lado, o Jucás, naquelas condições é capaz de regularizar 48% do volume afluente anual, que, para a Região Nordeste, representa uma excelente eficiência.

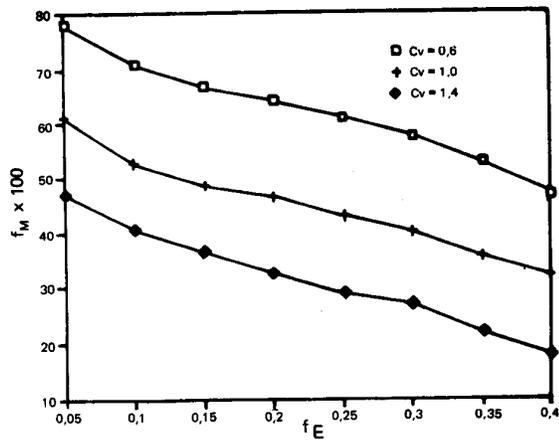


Figura 3. Relação entre o volume regularizado com 90% de garantia e o fator adimensional de evaporação para $f_k = 2,0$ e $Cv = 0,6; 1,0$ e $1,4$.

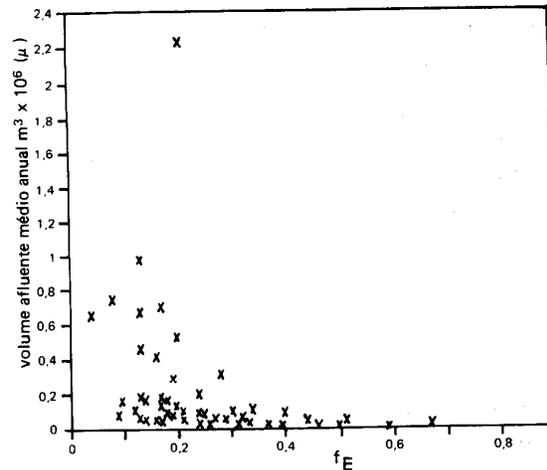


Figura 4. Pares de valores do coeficiente adimensional de evaporação e do volume afluente médio anual para 67 açudes no Nordeste do Brasil.

TABELA 01
DADOS RELATIVOS A 67 AÇUDES NO NORDESTE BRASILEIRO

Nome do Açude	Prec. (mm)	Evap. (mm)	F. Forma	Defluv. (hm^3)	f_E
Ayres de Sousa	841	2407	29635	82,7	0,20
Forquilha	828	2012	16494	18,4	0,26
Edson Queiroz	799	2763	10397	160,3	0,18
Pedregulho	778	2763	74904	21,7	0,67
Poço Comprido	799	2763	69439	90,7	0,40
Sem Nome	785	2503	128048	323,1	0,28
Taquara	841	2407	23142	130,0	0,20
Várzea da Volta	1344	2562	9515	52,4	0,16
Angicos	1079	2562	41768	48,8	0,32
Frecheirinha	1325	2562	6205	59,0	0,13
Paula Pessoa	1207	2562	12629	178,1	0,13
Jordão	1021	2562	19819	16,1	0,37
Sairi	1155	2562	18381	18,8	0,31
Campanário	1094	2562	51016	291,8	0,19
Diamante	1035	2562	10513	7,2	0,39
Jucás	808	2448	845	656,6	0,04
Soledade	360	2219	23853	13,1	0,51
Taperoá II	513	2219	20626	22,9	0,37
Serra Branca II	513	2219	3209	3,2	0,38
Taperoá III	395	2219	7009	55,2	0,21
Mucutu	457	2219	3284	20,3	0,22
Pelo Sinal	286	2219	9492	135,7	0,17
Gurjão	449	2219	3191	17,3	0,23
Porções	470	2219	12362	401,0	0,27
Camalau	641	2219	3357	48,0	0,14
Cordeiro	539	2219	7778	72,9	0,18
Jenipapo	711	3134	8644	678,3	0,13
Piracuruca	1221	2841	186066	531,1	0,20
Tinguis	1669	2841	174731	468,8	0,13
Encanto	709	3100	2668	75,0	0,18

Nome do Açude	Prec. (mm)	Evap. (mm)	F. Forma	Defluy. (hm ³)	Fe
Santana	709	3100	12410	18,0	0,38
Campo Grande	557	2858	6815	100,7	0,21
Caldeirão	1331	2481	74544	90,8	0,24
Castanhão	849	2895	56425	2229,0	0,21
Atalaia	1061	1755	50623	1059,0	0,12
Parnaguá	965	1755	458284	99,9	0,30
Angico	1043	1755	424250	37,4	0,17
Rangel	916	1755	142314	186,3	0,17
Contrato	1086	1755	44995	164,5	0,10
Armando Ribeiro Gonçalves	592	2100	89172	703,8	0,17
Pataxós	628	2100	27362	29,4	0,32
Caxitoré	805	2476	9137	88,2	0,18
General Sampaio	748	2476	9558	75,9	0,19
Pereira de Miranda	778	2476	51209	197,9	0,24
Frios	1019	2476	9612	14,6	0,29
Tejussuoca	638	2476	20452	7,4	0,27
Riacho do Paulo	805	2476	1976	7,5	0,24
Melancias	1019	2476	708	7,7	0,32
Orós	763	2100	78055	971,0	0,13
Arrojado Lisboa	775	2150	11848	747,7	0,08
Pedras Brancas	775	2150	15010	168,8	0,14
Cedro	807	1524	36140	18,1	0,20
Lima Campos	785	2624	34640	19,7	0,50
Riacho do Sangue	764	2759	15572	96,4	0,25
Poço do Barro	751	2468	20052	31,8	0,33
Quixeramobim	699	2706	18733	424,0	0,16
Várzea do Boi	472	2863	23749	45,0	0,44
Şanto Antônio de Russas	840	2468	21246	43,0	0,59
Joaquim Távora	679	2624	12263	5,0	0,59
Ema	789	2868	4091	10,4	0,46
Patu	747	1992	2956	80,3	0,09
Umari	1078	2634	1818	7,0	0,22
Prazeres	758	2634	339	10,2	0,14
Mendobim	724	2100	8247	30,6	0,20
Engenheiro Ávidos	832	2995	36879	109,3	0,34
São Gonçalo	832	2995	5620	22,8	0,31
Escondido	720	2964	34081	32,1	0,51

Cont. da Tabela 1

CONCLUSÕES

Os resultados alcançados permitiram extrair as conclusões abaixo descritas.

— O fator adimensional de evaporação é um importante indicador da eficiência de regularização de um reservatório.

— A escolha adequada dos locais onde implantar os açudes pode significar um decréscimo substancial nas perdas globais por evaporação em uma bacia hidrográfica.

— Não se pode afirmar que reservatórios construídos em rios de maiores vazões são sempre mais eficientes; entretanto, é lícito dizer que existe uma

tendência de que os grandes reservatórios sejam mais eficientes que os pequenos.

— A relação entre o incremento em volume regularizado e o incremento na capacidade de um reservatório, para um mesmo coeficiente de variação dos deflúvios, decresce quando o fator adimensional de evaporação cresce; isso significa que, do ponto de vista da eficiência hídrica, os reservatórios com maiores f_E devem ser construídos com menores valores de f_K .

Os chamados reservatórios de regularização anual, com capacidade da ordem de um milhão de metros cúbicos, por dificuldades na coleta de dados em tempo hábil, não foram incluídos no presente estu-

do. Esse segmento será objeto de análise no prosseguimento dessa pesquisa. Entretanto, a experiência do autor, em alguns trabalhos realizados na Região, mostra que esses reservatórios apresentam f_E 's acima de 0,60, o que significa uma baixa eficiência. Esse fato é comprovado na prática pela quantidade de pequenos açudes vazios durante os períodos de estiagem.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CAMPOS J. N. B. "A Procedure for Reservoir Sizing on Intermittent Rivers under High Evaporation Rate". Dissertação de Doutorado, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
- MORAN, P. A. P. "A Probability Theory of Dams and Storage System". **Australian Journal of Applied Science** vol. 5, 1954.
- MORAN, P. A. P. "A Probability Theory of Dams and Storage System". **Australian Journal of Applied Science** vol. 6, 1955.