

COMISSÃO BRASILEIRA PARA O PROGRAMA HIDROLÓGICO INTERNACIONAL - COBRAPHI  
DEPARTAMENTO NACIONAL DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA - DNAEE

SEMINÁRIO  
BALANÇO HÍDRICO NO BRASIL

DOCUMENTO FINAL

Brasília, 10 de março de 1987

Sala de Exposição do Ministério de Relações Exteriores

## MÉTODOS PARA A ESTIMAÇÃO DA EVAPORAÇÃO EM LAGOS

Dias, N.L.C.<sup>1</sup>, Kelman, J.<sup>1,2</sup> e Damázio, J.M. <sup>1,2</sup>

### RESUMO

Faz-se uma rápida revisão de alguns métodos em engenharia para a estimação da evaporação em lagos. Grosso modo, estes se dividem em: uso de tanques evaporimétricos e uso de modelos climatológicos. Ressalta-se a incerteza quanto à escolha do "coeficiente de tanque", bem como da inadequação de modelos que dão a evaporação sobre uma superfície líquida, como o de Penman, quando os seus dados de entrada são coletados em terra, em vez de sobre o lago. Como alternativa, comenta-se o uso do modelo CRLE, cujos resultados para Sobradinho são comparados com estimativas baseadas em dados evaporimétricos.

1 - Professor da Coordenação dos Programas de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro

2 - Pesquisador do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica, CEPTEL, Rio de Janeiro

## I - INTRODUÇÃO

Do total de água evaporado sobre a superfície dos continentes e oceanos anualmente, uma parcela ínfima corresponde à evaporação de lagos naturais ou artificiais. Não obstante, a evaporação em lagos é considerada como "perda" pelos planejadores de recursos hídricos, sendo sempre necessário fazer uma estimativa do seu valor em um reservatório, tanto na época do seu projeto quanto ao longo do seu período de operação. É interessante, observar que em regiões com escassez de recursos hídricos, como o Nordeste, torna-se vital estimar corretamente as perdas por evaporação.

As atividades do CEPEL e da COPPE nesta área têm por objetivo analisar os modelos atualmente disponíveis para a estimativa da evaporação a partir de dados climatológicos em termos de consistência teórica, requerimento de dados e importância de cada dado. Foi feito um estudo de caso com postos climatológicos ao redor do reservatório de Sobradinho. Maiores detalhes do trabalho podem ser encontrados em Dias, 1986.

Em todas as fórmulas, usa-se o sistema internacional de unidades (SI) com a evaporação expressa em quilogramas de água evaporados por metro quadrado por segundo  $\text{Kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ . Na apresentação dos resultados, os valores são convertidos para milímetros (mm).

## II - USO DE EVAPORÍMETROS

Possivelmente, o procedimento mais amplamente utilizado para estimar a evaporação em lagos seja o uso de dados evaporimétricos de tanques classe A. Supõe-se uma relação simples

$$E = CE_A$$

(1)

entre a evaporação em lago E e a evaporação em tanque  $E_{\Lambda}$ . Na equação (1) o coeficiente de tanque C em geral é menor que 1, sendo comum admitir-se o valor 0,7. Entretanto, há evidências de uma forte variação de C de acordo com a região, aproximando-se de 0,5 em climas áridos (Morton, 1983).

A título de ilustração, os valores anuais de C fornecidos por Sellers (1965) para alguns lagos estão listados abaixo

Lago	Coeficiente de Tanque
Salton Sea	0,52
Hefner	0,62
Mead	0,74
Mendota	0,82

Tabela 1 - Coeficientes de tanque  
Classe A para diversos lagos.

Fonte : Sellers, 1965

### III - MODELOS CLIMATOLÓGICOS

Neste trabalho, denominamos de modelos climatológicos aqueles que usam medidas de insolação, temperatura e umidade do ar, velocidade do vento e temperatura da água para a estimação de E. A base conceitual destes modelos é dada pelas equações de transferência de vapor e de Balanço de Energia:

$$E = f_T (e_o^* - e_a) \quad (2)$$

$$LE = \frac{R_{lo} - G}{1 + B_o} \quad (3)$$

Nas equações acima, há uma extensa lista de símbolos a definir:

$E$  é a evaporação  $[\text{Kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}]$

$f_T$  é o coeficiente de transferência de vapor  $[\text{Kg.m}^{-2}.\text{s}^{-1}.\text{Pa}^{-1}]$   
usualmente dado por

$$f_T = a + b V_a \quad (4)$$

onde  $V_a$  é a velocidade do vento  $[\text{m.s}^{-1}]$ ;  $a$  e  $b$  são constantes.

$e_o^*$  é a pressão de saturação de vapor d'água  $[\text{Pa}]$  à temperatura  $T_o$  da superfície da água  $[\text{K}]$ .

$e_a$  é a pressão parcial de vapor d'água do ar  $[\text{Pa}]$

$L$  é o calor latente de evaporação da água  $[\text{J.Kg}^{-1}]$

$R_{10}$  é a radiação líquida na superfície do lago  $[\text{W.m}^{-2}]$

$G$  é o fluxo de calor  $[\text{W.m}^{-2}]$  associado com o aquecimento/resfriamento das águas do lago, sendo importante em lagos profundos.

$B_o$  é a razão de Bowen, calculada por

$$B_o = \Omega \frac{T_o - T_a}{e_o^* - e_a} \quad (5)$$

onde  $T_a$  é a temperatura do ar  $[\text{K}]$  e  $\Omega$  é a constante psicrométrica ( $\Omega = 66,5 \text{ Pa.K}^{-1}$  ao nível do mar).

No sistema de equações (2) e (3) é interessante notar que i) são admitidas como incógnitas a temperatura da superfície  $T_o$ , de que são funções  $e_o^*$ ,  $R_{10}$  e  $B_o$ , e a evaporação  $E$  e ii) na sua derivação, supõe-se que  $e_a$  e  $T_a$  são medidos sobre a superfície da água.

Penman (1948) eliminou  $T_o$  das duas equações, obtendo uma solução analítica aproximada para o sistema (2) e (3):

$$E = \frac{d_a}{d_a + \Omega} \frac{R_{1a} - G}{L} + \frac{\Omega}{d_a - \Omega} f_T (e_a^* - e_a) \quad (6)$$

onde

$d_a$  - inclinação da curva de pressão de saturação de vapor d'água à temperatura  $T_a$

$R_{1a}$  - radiação líquida supondo que a superfície do lago encontra-se à temperatura do ar  $T_a$

$e_a^*$  - pressão de saturação de vapor d'água à temperatura  $T_a$

Após o trabalho pioneiro de Penman, numerosos estudos se seguiram no sentido de obter soluções mais precisas para o sistema de equações (2) e (3) (Dias, 1986). Entretanto, para a maioria das aplicações, a equação de Penman apresenta resultados muito bons, sendo seu uso largamente difundido em hidrologia.

Priestley e Taylor (1972) propuseram uma equação empírica tendo por base o primeiro termo da equação (6), que obteve largo sucesso quando comparada com métodos mais sofisticados:

$$E = \alpha \frac{d_o}{d_o + \Omega} \frac{R_{1o} - G}{L} \quad (7)$$

onde  $\alpha = 1,26$ ,

e  $d_o$  é a inclinação da curva de pressão de saturação de vapor d'água à temperatura  $T_o$ .

Tanto a equação de Penman quanto a de Priestley e Taylor apresentam-se como boas alternativas para estimar E a nível mensal deste que:

- i) Os dados climatológicos sejam coletados sobre o lago;
- ii) Caso o lago seja profundo, o termo G seja convenientemente estimado.

Assim, mesmo nos casos em que G não é importante (lagos rasos), a condição (i) acima limita seriamente o uso das equações (6) ou (7). De fato, informações climatológicas coletadas sobre a água são raras na prática.

Norton (1983) propõe uma solução interessante no seu modelo CRLE. Primeiro, ele resolve o sistema de equações (2) e (3) com valores de umidade e temperatura do ar medidos numa estação climatológica em terra e aqui denominados  $e_{at}$  e  $T_{at}$ . A solução do sistema é o par  $(E_p, T_p)$ , significando "evaporação potencial" e "temperatura de equilíbrio". Uma vez que em terra a umidade é menor, e a temperatura maior, que sobre o lago, a evaporação potencial  $E_p$  deverá superar a evaporação do lago E. Por outro lado, observa-se que a temperatura  $T_p$  é muito menos sensível às diferenças entre o ambiente terrestre e o do lago. Assim, a evaporação em lago do modelo CRLE é dada por uma fórmula análoga à de Priestley e Taylor:

$$E = \alpha \frac{d_p}{d_p + \beta} \left( \frac{R_{lp}}{L} + \frac{\beta}{L} \right) \quad (8)$$

onde  $\alpha = 1,12$  e  $\beta = 13 \text{ W.m}^{-2}$ . Notar que em todo o procedimento acima descrito, admite-se  $G=0$ , isto é, que o lago é raso. Todos os símbolos de (8) podem ser compreendidos por analogia com os anteriores, com os significados de  $(T_p, d_p$  e  $R_{lp})$  correspondendo aos de  $(T_o, d_o$  e  $R_{lo})$ .

Em resumo, dos quatro métodos acima, apenas o uso de dados evaporimétricos ou do modelo CRLE prescindem de medidas sobre a água. Naturalmente, o uso das equações (6) ou (7) com dados coletados em terra para estimar a evaporação em lago está conceitualmente errado.

#### IV - ESTIMATIVAS DE EVAPORAÇÃO EM SOBRADINHO

O reservatório de Sobradinho situa-se no rio São Francisco, 40 Km a montante das cidades de Juazeiro (BA) e Petrolina (PE). Os dados usados neste estudo são informações climatológicas de rotina em 3 postos climatológicos ao redor do reservatório, nos anos 1979-1982. Informações sobre os postos encontram-se na tabela 2. A figura 1 mostra a sua localização em relação ao reservatório.

Posto	Código DNAEE	Latitude	Longitude	Altitude
Petrolina	00940006	09o23' S	40o30' W	376,0 m
Remanso	00942007	09o30' S	42o06' W	400,0 m
Barra	01143005	11o05' S	43o10' W	401,0 m

Tabela 2 - Postos Climatológicos utilizados. Fonte: Inventário das Estações Pluviométricas - 1983 (DNAEE)

Em cada posto, foram usadas as médias mensais de evaporação em tanque classe A, temperatura do ar, insolação e umidade relativa do ar para estimar a evaporação em lago usando a equação 1 (aplicação de um coeficiente de tanque  $C = 0,7$ ) e o modelo CRLE.

A figura 2 apresenta os dados de evaporação em tanque classe A dos postos de Remanso e Barra (dados evaporimétricos de Petrolina não estavam disponíveis). A figura 3 apresenta os



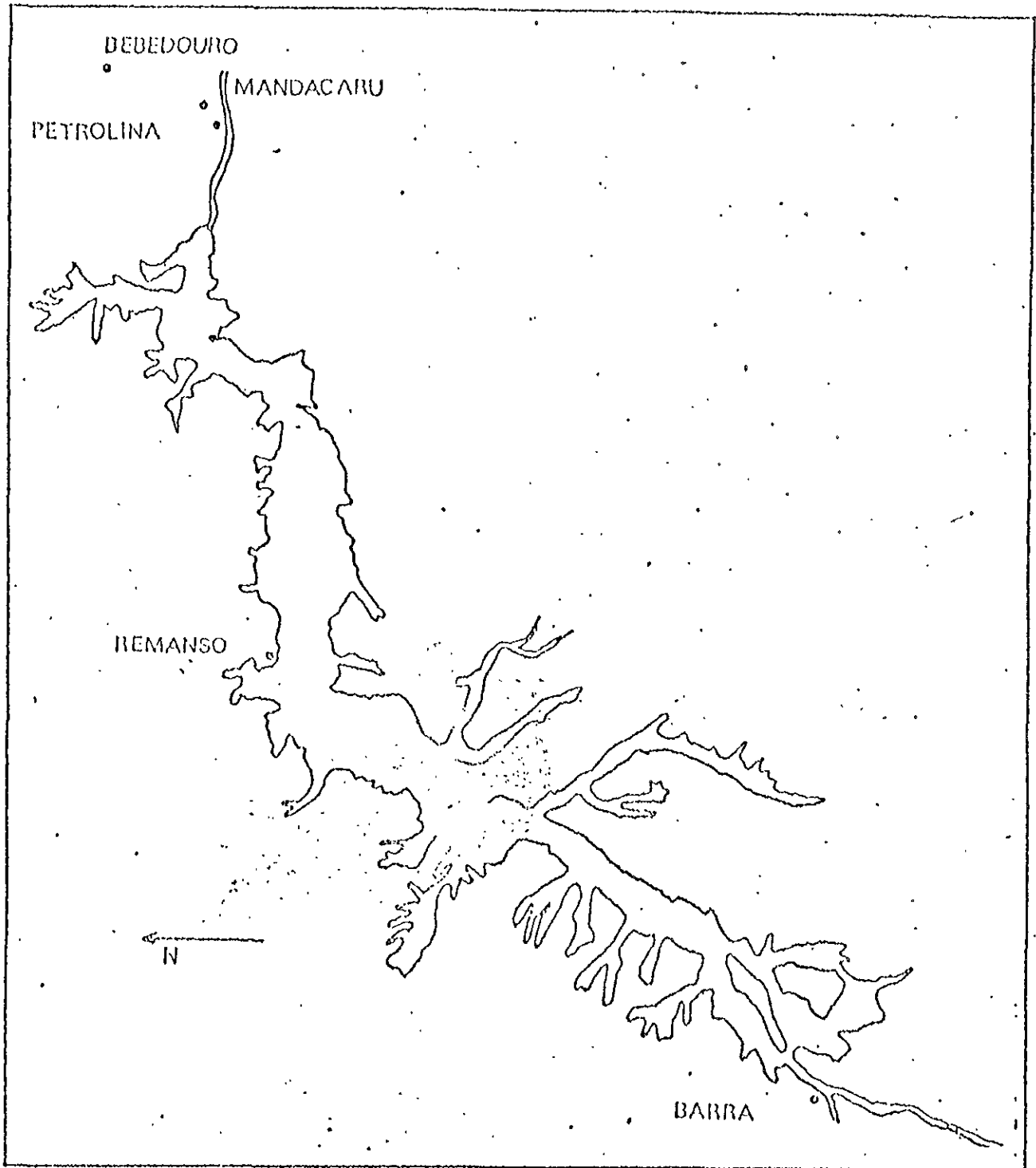


Figura 1 - Localização do Reservatório de Sobradinho e dos cinco postos climatológicos utilizados

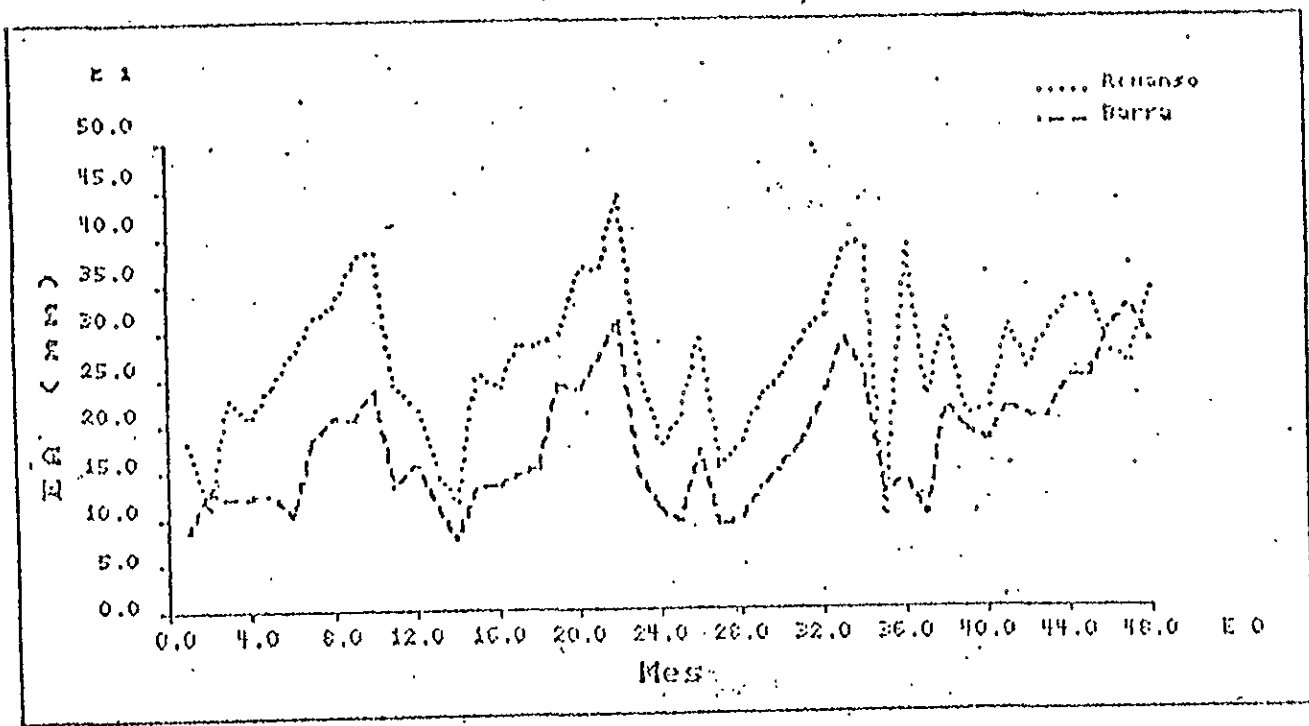


Figura 2 - Evaporação em Tanque Classe A Média Mensal em Remanso e Barra ; 1979-1982.

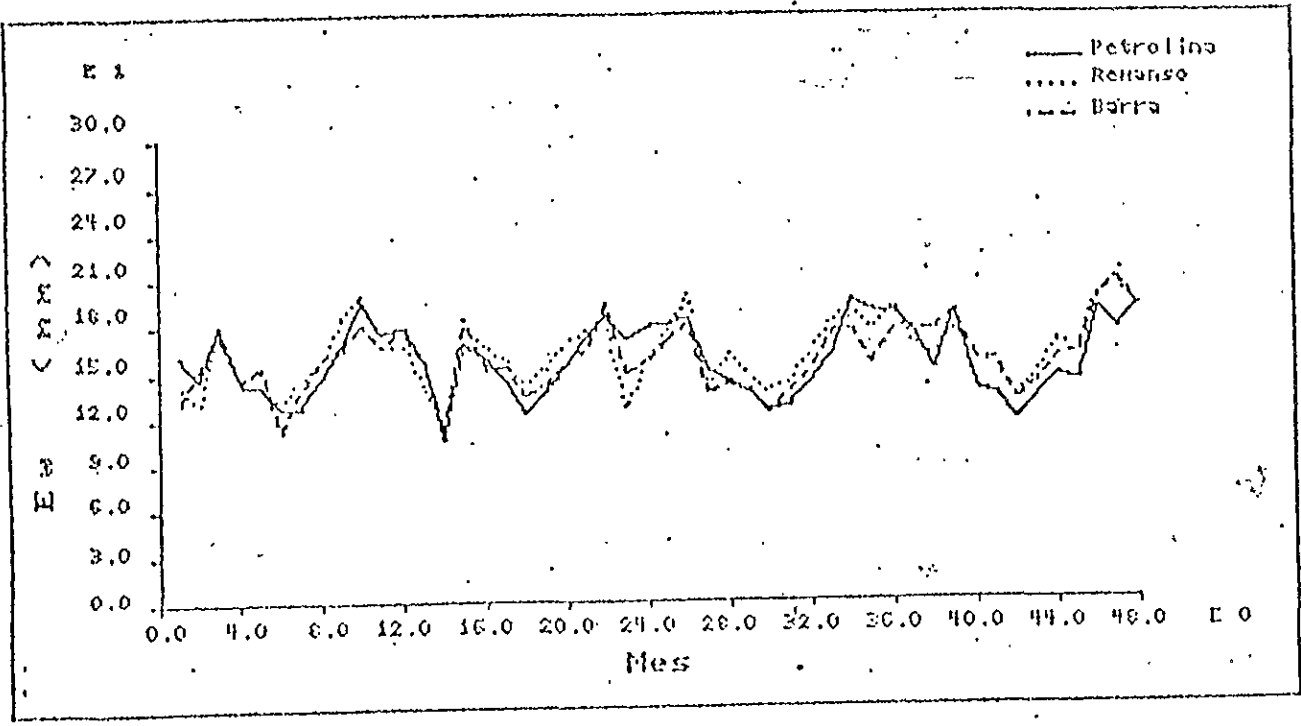


Figura 3 Evaporação em lago raso ( $E_w$ ) estimada pelo CRLE para o lago de Sobradinho a partir do postos de Petrolina, Remanso e Barra; 1979 - 1982

valores de evaporação mensal calculados para Sobradinho pelo modelo CRLE a partir dos dados de cada um dos três postos.

Enquanto que os dados evaporimétricos são muito sensíveis ao ponto de coleta, apresentando valores bastante diferentes em Remanso e Barra, as estimativas de evaporação em lago do CRLE são muito mais uniformes. Em outras palavras, não importa em que ponto da margem do reservatório se colem os dados, as estimativas de evaporação em lago do CRLE serão praticamente as mesmas.

A tabela 3 lista a evaporação anual em mm estimada pelo CRLE, sendo um resumo da figura 3. A tabela 4 dá a evaporação anual do lago em mm obtida aplicando-se um coeficiente  $C=0,7$  aos dados evaporimétricos. A última coluna de cada tabela dá a diferença percentual das estimativas obtidas com os dados de Barra e Remanso.

Posto Ano	Petrolina	Remanso	Barra	$ (B-R)/R $
1979	1905	1913	1863	0,026
1980	1872	1874	1866	0,004
1981	1938	2011	1981	0,070
1982	1903	2038	2049	0,005

Tabela 3 - Evaporação Anual em Lago Raso (mm) Estimada pelo CRLE

Posto Ano	Remanso	Barra	$ (B-R)/R $
1979	2187	1322	0,396
1980	2288	1469	0,358
1981	2247	1386	0,383
1982	2382	1940	0,186

Tabela 4 - Evaporação anual em lago raso (mm) estimada por dados evaporimétricos com um coeficiente  $C=0,7$

## V - CONCLUSÕES

Alguns dos modelos climatológicos desenvolvidos para obter a evaporação de uma superfície líquida pressupõem o conhecimento de informações climatológicas sobre a água, ou da temperatura da superfície do lago. Isto restringe o seu uso, na prática, uma vez que tais informações não são frequentes.

O uso de dados evaporimétricos é muito difundido. entretanto, o valor do "coeficiente de tanque" tem uma grande variação regional. Em particular, em Sobradinho, dois evaporímetros situados em postos nas margens do reservatório apresentam diferenças anuais que vão de 18,6% a 39,6%.

O modelo CRLE apresentou resultados uniformes, com estimativas muito parecidas nos 3 postos em que foi aplicado. As diferenças observadas neste caso vão de 0,4% a 2,6%. Conforme pode ser verificado em Dias, 1986, os dados de entrada do CRLE (temperatura do ar, umidade e insolação) são eles mesmos bastante uniformes na região, o que explica os resultados aqui apresentados.

É importante notar que não se conhece a evaporação "real" do lago, de modo que nos limitamos a comparar, conceitualmente e na prática, cada um dos modelos apresentados. Em particular, é bom lembrar que o modelo empírico de Priestley e Taylor tem bons resultados mencionados na literatura, e pode ser usado quando se dispõe de dados de temperatura da água e uma maneira de se estimar  $R_{10}$  e G.

## VI - BIBLIOGRAFIA

Sellers, W.D.; "Physical Climatology", The University of Chicago Press., Chicago & London (1965)

Norton, F.I.; "Operational Estimates of Lake Evaporation", Journal of Hydrology, vol. 66, pp. 77-100 (1983)

Pennan, H.L. "Natural Evaporation from Open Water, Bare Soil, and Grass" Proceedings of the Royal Society, London, A193, pp. 120-146 (1948).

Priestley, C.H.B. e Taylor, R.J.; "On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large-Scale Parameters", Monthly Weather Review, vol. 100, pp. 81-92 (1972).

De Bruin, H.A.R. e Keijman, J.Q.; "The Priestley-Taylor Evaporation Model Applied to a Large Shallow Lake in the Netherlands", Journal of Applied Meteorology, vol. 18, pp. 898-903 (1979)

Dias, N.; "Estimativas Climatológicas de Evaporação em Lagos", tese de mestrado, COPPE/UFRJ, (1986)