

# ESTIMATIVA DA EVAPORAÇÃO NO LAGO DE SOBRADINHO COM O MÉTODO DO BALANÇO DE ENERGIA

*Alfredo Ribeiro Neto<sup>1</sup>, Suzana Maria Gico Lima Montenegro<sup>2</sup>, Ada Ravana Costa Moura<sup>3</sup> & José  
Almir Cirilo<sup>4</sup>*

**RESUMO** --- O método do balanço de energia foi aplicado na estimativa da evaporação no reservatório de Sobradinho (Bahia/Brasil). Foram utilizadas medições de temperatura da água do lago, que permitiram a estimativa de todos os termos da equação do balanço de energia (com exceção do fluxo de calor para o solo). A partir da evaporação calculada com o método do balanço de energia, passou-se a ter um valor de referência que permitiu a avaliação de outros métodos. Nesse sentido, foram avaliados os métodos de Penman e CRLE (com o último mostrando melhores resultados). Futuramente, outros métodos poderão ser avaliados da mesma forma. Além da estimativa da evaporação no lago, realizou-se, também, o cálculo dos termos do balanço de energia. Os resultados mostraram que a taxa de variação da entalpia e a advecção da entalpia possuem valores baixos se comparados com os demais termos (calor latente e sensível). Ao se desconsiderar esses termos no cálculo da evaporação, verificou-se que o erro é inferior a 1%. Isso encoraja o uso do método do balanço de energia sem a necessidade de medições da temperatura da água no lago. Novas medições e estudos precisam ser realizados com o intuito de confirmar as conclusões obtidas neste estudo.

**ABSTRACT** --- The energy budget method has been used to estimate the evaporation at Sobradinho reservoir (Bahia/Brazil). There have been used lake water temperature measurements, which allowed to calculate all energy budget terms (with exception of heat flux at the lake's bottom). The energy budget method is generally considered as a reference method. The results obtained with energy budget method have been used to evaluate Penman and CRLE methods (CRLE results were quite similar to energy budget). In the future, other methods can be evaluated using the same methodology. Besides the evaporation calculation, we have also estimated the terms of the energy budget. The results showed that the rate of change of stored enthalpy and the heat flux advected have low values when compared with latent heat and sensible heat. If the evaporation is calculated without these terms, the error is lower than 1%. This fact encourages the use of energy budget method without the necessity of lake water temperature measurements. New measurements and studies need to be accomplished with the objective to confirm the conclusions obtained in this work.

**Palavras-chave:** Evaporação em lagos, balanço de energia em lagos, reservatório de Sobradinho.

---

1) Bolsista de Desenvolvimento Científico Regional no Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco. Av. Acad. Hélio Ramos, s/n. Cidade Universitária, 50.740-530, Recife/PE, e-mail: ribeiront@hotmail.com.

2) Professora adjunta, Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Engenharia Civil.

3) Mestranda em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco.

4) Professor adjunto, Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Engenharia Civil.

## 1 - INTRODUÇÃO

Para o gerenciamento e operação adequados de um reservatório de geração de energia hidroelétrica, é preciso que se estimem com a maior precisão possível os termos que compõem o balanço hídrico no reservatório. Os principais termos do balanço são as vazões afluente e defluente, variação do volume armazenado, evaporação, precipitação sobre o lago e captações de água.

Fazendo uso do cálculo do balanço hídrico, ONS (2003) apresenta estimativa das perdas de água que ocorrem no reservatório de Sobradinho (Bahia/Brasil). Observou-se que o volume médio das perdas ocorridas entre 1978 e 2002 é de  $230,0 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Desse total, entre 16,0% e 45,0% das perdas não puderam ser explicadas por meio da estimativa dos termos do balanço hídrico, sendo atribuídos às retiradas de água, infiltração e erros dos processos de cálculo. Dos processos de cálculo envolvidos, destacam-se a variação do volume do reservatório, a vazão afluente e a evaporação.

Com o intuito de reduzir as incertezas associadas à estimativa da evaporação, diversas pesquisas têm se voltado para o estudo e avaliação de diferentes métodos de cálculo da evaporação em Sobradinho. Este trabalho procura contribuir com esses estudos e tem como objetivo aplicar o método do balanço de energia e utilizar os resultados para comparação com outros métodos de cálculo da evaporação. O método do balanço de energia, que ainda não foi aplicado em Sobradinho, possui bom embasamento físico e tem sido utilizado como método de referência para a avaliação de métodos de cálculo da evaporação em lagos (Winter *et al.*, 1995; Vallet-Coulomb *et al.*, 2001; Reis & Dias, 1998).

Foram realizados testes com os métodos de Penman e CRLE (*Complementary Relationship Lake Evaporation*) para o mesmo período de dados. Esses dois métodos utilizam apenas informações levantadas em estações climatológicas, ao contrário do método do balanço de energia, que necessita, também, de medições do perfil de temperatura da água no lago. A comparação dos resultados de outros métodos com os resultados obtidos com o método do balanço de energia pode ajudar a definir qual método representa melhor o processo de evaporação no lago. A intenção é saber qual dos métodos (que utilizam apenas informações de estações climatológicas) fornece valores de evaporação mais próximos do calculado pelo método do balanço de energia.

## 2 – ÁREA DE ESTUDO E DADOS CLIMATOLÓGICOS

### 2.1 – Localização

O Reservatório de Sobradinho está localizado no Estado da Bahia, a aproximadamente 40 km das cidades de Petrolina/PE e Juazeiro/BA, dentro da região fisiográfica do sub-médio São Francisco (Figura 1). Com cerca de 350 km de extensão, o reservatório possui uma superfície de

espelho d'água de 4.214 km<sup>2</sup>, com capacidade de armazenamento de 34,1 bilhões de metros cúbicos em sua cota nominal de 392,50 m (Chesf, 2006).

A região do sub-médio caracteriza-se pelo clima tipicamente semi-árido, com precipitação média anual de 350 mm na região de Juazeiro/Petrolina, temperatura média anual de 18° a 27°C e evaporação potencial da ordem de 3.000 mm/ano (Codevasf, 2006). A região apresenta baixo índice de nebulosidade e grande incidência de radiação solar, que associados às altas temperaturas são responsáveis pelos altos índices de evapotranspiração, chegando a 1.400 mm.ano-1 (Pereira, 2004).

## 2.2 – Estações climatológicas

Os dados utilizados para estimativa da evaporação foram obtidos de estações climatológicas e de campanhas de medição de temperatura da água no lago. Foram utilizadas informações de duas estações climatológicas localizadas próximas ao reservatório: Sobradinho e Remanso. Ambas as estações são operadas pela Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (Chesf) (localização e descrição na Figura 1 e Tabela 1). As variáveis climatológicas utilizadas são: temperatura do ar, insolação, velocidade do vento e umidade relativa.

Tabela 1 – Estações climatológicas próximas ao reservatório de Sobradinho

Estação	Operadora	Código	Longitude	Latitude
Sobradinho	Chesf	-	-40,83	-9,42
Remanso	Chesf	82979	-42,08	-9,62

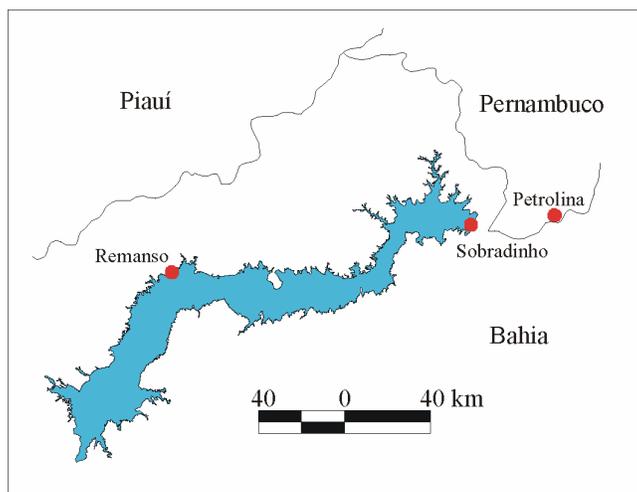


Figura 1 – Localização das estações climatológicas próximas ao reservatório de Sobradinho

## 2.3 – Estações fluviométricas

A Divisão de Gestão de Recursos Hídricos (DORH) da Chesf forneceu dados das estações fluviométricas de Remanso, Xique-Xique, Pilão Arcado, Sento Sé e Sobradinho (Figura 2). Foram

obtidas séries de cota da água com passo de tempo diário para essas estações, série de vazão diária defluente do lago, além da curva cota x área do reservatório.

#### **2.4 – Dados de temperatura do lago**

Os dados da temperatura do lago de Sobradinho foram obtidos a partir do trabalho realizado pelo Departamento de Pesca da Universidade Federal Rural de Pernambuco (DEPESCA/UFRPE), que contém resultados relativos a períodos trimestrais, de outubro de 2001 a abril de 2003, totalizando sete conjuntos de valores ou sete passos de tempo. A situação ideal é o levantamento com intervalo de tempo inferior a três meses. Entretanto, em virtude das dimensões do lago, torna-se inviável a medição dos perfis de temperatura com intervalo mensal, por exemplo. Por outro lado, deve-se destacar que lagos localizados em regiões de clima tropical apresentam pequena variação sazonal da temperatura da água e, em alguns casos, a variação diária é superior à sazonal (Esteves, 1998). Dessa forma, as medições trimestrais podem ser uma boa aproximação do comportamento térmico e da variabilidade da energia interna do lago de Sobradinho ao longo do tempo.

No levantamento realizado pelo DEPESCA/UFRPE, foram utilizadas 22 estações de amostragem, distribuídas a montante da barragem, contemplando os quatro trechos principais do reservatório: porção inferior (a montante da barragem), incluindo o meandro da cidade de Casa Nova (BA); a porção norte, entre Casa Nova e Pilão Arcado (BA); a porção sul, entre Sobradinho e Sento Sé (BA); e a porção superior, entre Sento Sé, Pilão Arcado e Xique-Xique. A metodologia de amostragem foi adotada de forma a considerar as diferentes regiões do reservatório, a zona de transição rio-reservatório, suas diferentes reentrâncias e a presença de tributários (FADURPE, 2002). A Figura 2 apresenta a localização das estações. A temperatura da água foi determinada ao longo da coluna d'água em três pontos: superfície, meio e fundo do lago.

Neste trabalho, foram utilizadas as informações de 08 das 22 estações de amostragem, as quais são apresentadas na Figura 3. Selecionaram-se as estações de amostragem localizadas próximo às estações fluviométricas. Isso se fez necessário porque, para o cálculo da variação da entalpia, necessita-se do valor da cota do fundo do lago no ponto de medição.

Além disso, procurou-se utilizar estações que representassem as diferentes zonas de profundidade do lago. A Figura 3 apresenta o modelo numérico do terreno do lago de Sobradinho determinado por Dantas (2005), juntamente com as estações selecionadas. Como pode ser visto, as estações de amostragem estão bem distribuídas no interior do lago e representam todas as zonas de profundidade.

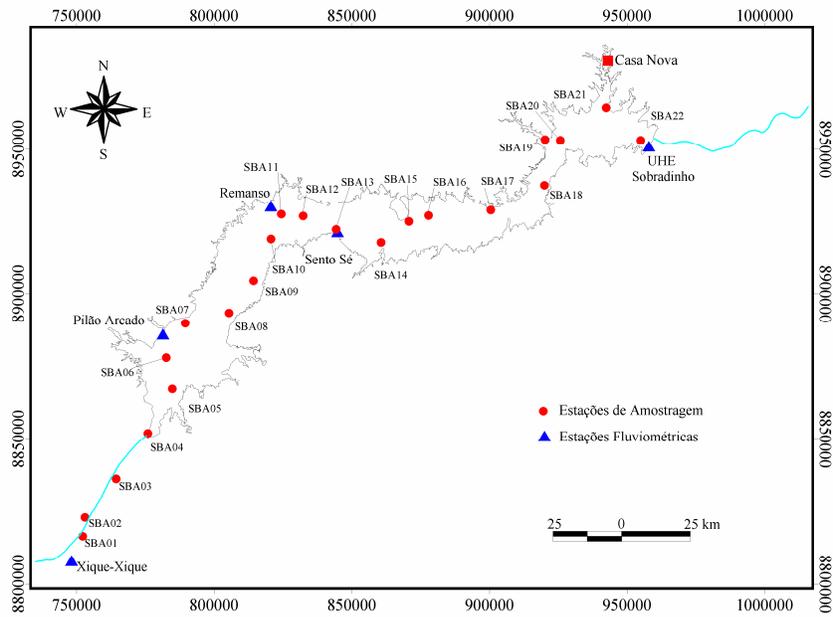


Figura 2 – Estações de monitoramento da temperatura nas campanhas realizadas pelo DEPESCA/UFRPE.

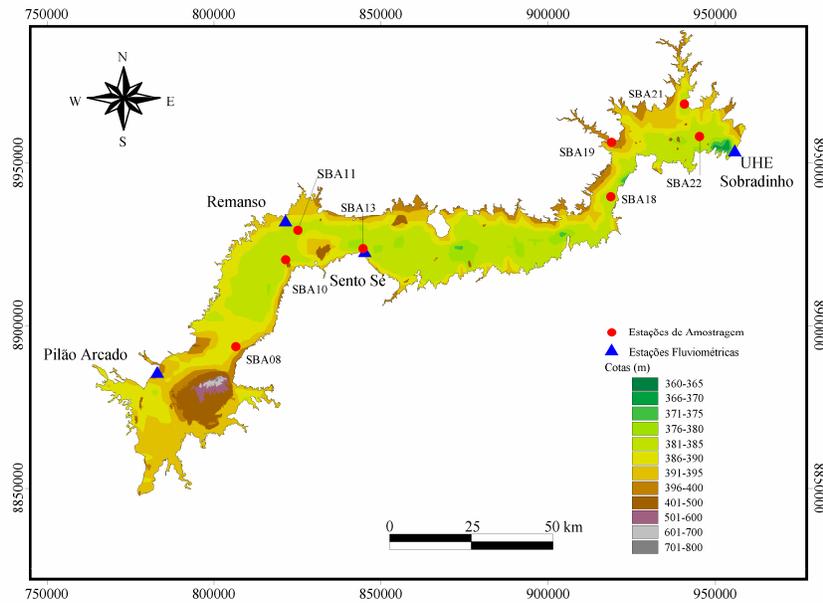


Figura 3 – Modelo numérico do terreno do lago de Sobradinho juntamente com as estações de amostragem utilizadas.

### 3 – TRABALHOS REALIZADOS NO LAGO DE SOBRADINHO

Desde o enchimento do lago de Sobradinho em 1978, diversas pesquisas têm sido desenvolvidas com o objetivo de estimar a evaporação do espelho d'água, utilizando métodos baseados na transferência de massa, métodos combinados, equações empíricas, balanço hídrico e evaporímetros.

Dentre os métodos utilizados, destacam-se o método CRLE e o tanque classe A (Dias (1986), Chesf (1992), Acioli *et al.* (1992), Pereira (2004) e Acioli *et al.* (2004)). Além desses métodos, utilizaram-se, também, os métodos de Penman e Budyko (Dias, 1986), Linacre e Kohler *et al.* (Pereira, 2004) e balanço hídrico (Acioli *et al.*, 1992).

A evaporação média anual calculada com os diversos métodos é apresentada na Tabela 2. Os valores obtidos possuem grande variação (de 1.529 a 2.528 mm.ano<sup>-1</sup>), cuja diferença corresponde a 65% do valor mínimo. O valor médio é de 2.030 mm.ano<sup>-1</sup> e o desvio padrão corresponde a 246 mm.ano<sup>-1</sup>. Dos métodos utilizados, balanço hídrico e tanque classe A apresentaram as maiores discrepâncias quando comparados com os demais métodos.

Tabela 2 - Evaporação no lago de Sobradinho.

Método	Evaporação (mm)	Período	Estação	Referência
Tanque Classe A	2025,70	1980-1999	Sobradinho	Pereira (2004)
	2445,00	1978-1991	Sobradinho	Acioli <i>et al.</i> (1992)
	2276,00	1979-1982	Remanso	Dias (1986)
	2327,00	1978-1991	Remanso	Acioli <i>et al.</i> (1992)
	1529,25	1979-1982	Barra	Dias (1986)
Modelo CRLE	1795,97	1980-1999	Sobradinho	Pereira (2004)
	2023,35	1978-1979	Sobradinho	CHESF (1992)
	1987,00	1978-1991	Sobradinho	Acioli <i>et al.</i> (1992)
	1904,50	1979-1982	Petrolina	Dias (1986)
	1959,00	1979-1982	Remanso	Dias (1986)
	2013,00	1978-1991	Remanso	Acioli <i>et al.</i> (1992)
	2106,00	1931-1960	Remanso	Acioli <i>et al.</i> (2004)
1912,25	1979-1982	Barra	Dias (1986)	
Modelo Linacre	2149,02	1980-1999	Sobradinho	Pereira (2004)
Modelo Kohler <i>et al.</i>	1904,13	1980-1999	Sobradinho	Pereira (2004)
	1824,00	1978-1991	Sobradinho	Acioli <i>et al.</i> (1992)
	1826,00	1978-1991	Remanso	Acioli <i>et al.</i> (1992)
Balanço Hídrico	2528,00	1978-1991	-	Acioli <i>et al.</i> (1992)

## 4 – MÉTODOS DE CÁLCULO DA EVAPORAÇÃO

### 4.1 – Método do balanço de energia

Para o cálculo da evaporação por meio do método do balanço de energia-razão de Bowen, utiliza-se a seguinte equação (Reis & Dias, 1998):

$$R_n + F_i - F_o = H + LE + G + D \quad (1)$$

onde  $R_n$  é a radiação líquida,  $F_i$  e  $F_o$  são os fluxos de calor advectado pelas vazões afluente e defluente do lago,  $H$  é o fluxo de calor sensível,  $LE$  é o fluxo de calor latente,  $G$  é o fluxo de calor através do fundo do lago e  $D$  é a taxa de mudança de entalpia da água do lago. Neste trabalho, o termo  $G$  não foi considerado no cálculo da evaporação, pois este termo é geralmente desprezado (Assouline & Mahrer, 1993).

A determinação do termo  $H$  não é simples, envolvendo obstáculos semelhantes à determinação direta da evaporação (Varejão-Silva, 2005). Para contornar esta dificuldade, utiliza-se a razão de Bowen, definida pela equação 2. A razão de Bowen estabelece que a relação entre o calor sensível e o calor latente é proporcional às diferenças de temperatura e pressão de vapor, ou seja:

$$\beta = \frac{H}{LE} = \gamma \frac{T_s - T_a}{e_s - e_a} \quad (2)$$

onde  $\beta$  é a razão de Bowen,  $\gamma$  é o parâmetro psicométrico (0,666 mbar),  $T_s$  é temperatura da superfície da água (°C),  $T_a$  temperatura do ar (°C),  $e_s$  é a pressão parcial do vapor saturado à temperatura da superfície (mbar) e  $e_a$  é a pressão parcial do vapor de água a uma altura acima da superfície (mbar) (Shuttleworth, 1993):

$$e_s = 6,11 \cdot \exp\left(\frac{17,27 \cdot T_a}{T_a + 237,3}\right) \quad (3)$$

$$e_a = \frac{UR \cdot e_s}{100} \quad (4)$$

Substituindo o termo  $H/LE$  dado pela razão de Bowen na equação 1, chega-se a seguinte equação:

$$LE = \frac{R_n + F_i - F_o - D}{1 + \beta} \quad (5)$$

Para a estimativa de  $\beta$  (equação 2), foram utilizados os dados da temperatura da superfície da água para períodos trimestrais, de outubro de 2001 a abril de 2003. Para as informações climatológicas de pressão de vapor e temperatura do ar, foram utilizados os dados das estações de Sobradinho e Remanso. A seguir, apresenta-se o cálculo do termo da entalpia (D) e dos termos  $F_i$  e  $F_o$  necessários para a solução da equação 5.

#### 4.1.1 Estimativa da taxa de variação da entalpia

A taxa de variação da entalpia é dada pela seguinte equação (Dias & Rocha, 1999):

$$D = \frac{1}{A_s \cdot \Delta t} \cdot \sum_{z_f}^z [\rho_w \cdot c_w](T_m(z)) \cdot [T(z, t + \Delta t) - T(z, t)] \cdot A(z) dz \quad (6)$$

onde D é a taxa de variação da entalpia ( $W \cdot m^{-2}$ ),  $A_s$  é a média das áreas superficiais entre os instantes t e t +  $\Delta t$ ,  $\Delta t$  é o intervalo de tempo entre duas medições consecutivas (s),  $z_f$  é a cota do fundo do lago (m),  $z$  é a cota mínima da superfície entre dois intervalos de medição consecutivos (m),  $\rho_w$  é a massa específica da água ( $kg \cdot m^{-3}$ ),  $c_w$  é o calor específico da água ( $J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ),  $T(z, t + \Delta t)$  é a temperatura no instante t +  $\Delta t$  (K),  $T(z, t)$  é a temperatura no instante t (K),  $A(z)$  é a área do lago em função da cota ( $m^2$ ).

A expressão  $T_m(z)$  na equação 6 indica que as constantes  $\rho_w$  e  $c_w$  devem ser calculadas à temperatura média, no mesmo nível e em intervalos de tempos consecutivos. Como a variação é pequena, os valores da massa específica ( $\rho_w$ ) e do calor específico da água ( $c_w$ ) foram considerados constantes, onde  $\rho_w = 1000 \text{ kg} \cdot m^{-3}$  e  $c_w = 4179 \text{ J} \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ .

O perfil de temperatura é utilizado para calcular os termos  $T(z, t + \Delta t)$  e  $T(z, t)$ . Para a construção do perfil de temperatura da água no lago, foi feita interpolação linear entre as cotas da superfície, do meio e do fundo. Interpolou-se, para cada intervalo de tempo, as cotas entre a superfície e o meio e entre o meio e o fundo. Dessa forma, foi determinado o perfil de temperatura do lago, tomando valores de metro em metro. A Figura 4 mostra, a título de ilustração, o perfil de temperatura da estação SBA22 (ver Figura 3 para localização) para todas as campanhas de medição.

Nas estações fluviométricas, foram obtidos os dados das cotas da superfície da água, para o período de análise. O conhecimento da cota da superfície é útil para se obter a cota do fundo do lago, bem como de todo o perfil.

A cota  $z$  na equação 6 é a menor cota da superfície entre dois intervalos de tempo consecutivos. Esta cota é tomada como referência para construção dos perfis de temperatura, nos tempos t e t +  $\Delta t$ .

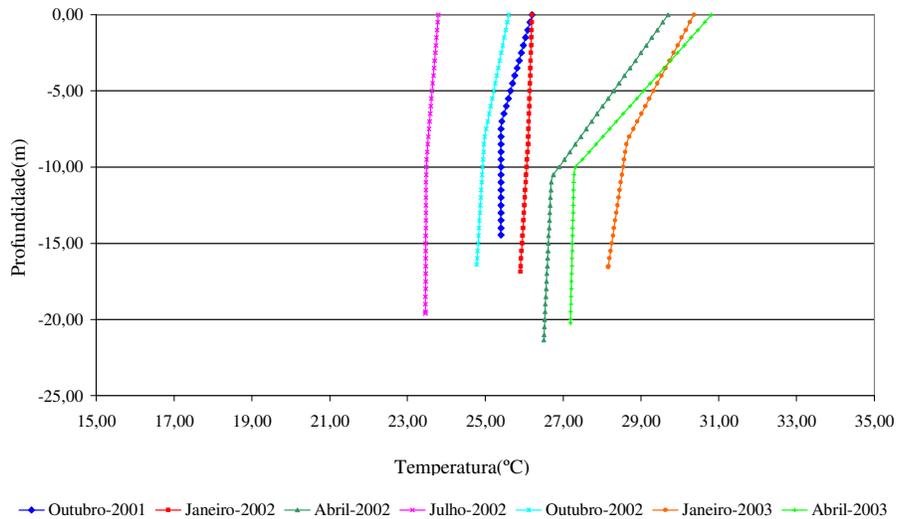


Figura 4 – Perfil de temperatura da estação de amostragem SBA22.

#### 4.1.2 Advecção da entalpia

A advecção da entalpia (termos  $F_i$  e  $F_o$  na equação 1) representa a variação horizontal do fluxo de entrada e saída de calor num sistema e também está relacionada ao transporte de massa (Varejão-Silva, 2005). A advecção de entalpia é dada pela equação 7 (Dias & Rocha, 1999):

$$F_o - F_i = \frac{\rho_w \cdot Q \cdot c_w \cdot \Delta T}{A_s} \quad (7)$$

onde  $F_o - F_i$  é a advecção da entalpia ( $W \cdot m^2$ ),  $Q$  é a vazão defluente do período ( $m^3 \cdot s^{-1}$ ),  $\Delta T$  é a diferença entre a temperatura do volume d'água defluente e a temperatura do volume d'água afluyente (K).

Os valores da massa específica ( $\rho_w$ ) e do calor específico da água ( $c_w$ ) foram considerados constantes. Para o cálculo do termo  $\Delta T$ , foram utilizados os dados das estações SBA4 e SBA22. Estas estações foram escolhidas por representarem as temperaturas afluyente e defluente, respectivamente.

#### 4.2 – Método de Penman

O método de Penman é um método combinado que envolve considerações teóricas do método aerodinâmico e do método do balanço de energia. Sua formulação é dada pela equação 8 (Tucci & Beltrame, 2004):

$$E = \left[ \left( \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) \frac{R_n}{L} + \left( \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \right) E_a \right] \quad (8)$$

onde  $\Delta/(\Delta + \gamma)$  é o coeficiente do termo energético e  $\gamma/(\Delta + \gamma)$  é o coeficiente do termo aerodinâmico. Esses termos funcionam como ponderadores da evaporação calculada com os métodos do balanço de energia e aerodinâmico e sua soma é igual a 1. Por exemplo, sob uma temperatura do ar de 30°C o termo energético corresponde a 78% e o termo aerodinâmico corresponde a 22%. A inclinação  $\Delta$  (mbar/°C) da curva de saturação é dada por (Shuttleworth, 1993):

$$\Delta = \frac{17,27 \cdot 237,3 \cdot e_s}{(T_a + 237,3)^2} \quad (9)$$

Finalmente, o poder evaporante do ar à sombra,  $E_a$  (mm/dia), é dado pela equação (Tucci & Beltrame, 2004):

$$E_a = 0,35 \cdot \left( 0,5 + \frac{u_2}{160} \right) \cdot (e_s - e_a) \quad (10)$$

onde  $u_2$  (km/dia) é a velocidade do vento a 2 metros acima da superfície evaporante.

### 4.3 – Método CRLE

O modelo CRLE foi desenvolvido por Morton (1983b), baseado na hipótese de que variações na evapotranspiração potencial e real são complementares devido às variações na disponibilidade de água no solo, que provocam alterações no déficit de saturação do ar, temperatura do ar e no balanço de energia radiante (Roque & Sansigolo, 2000).

Segundo Fontes *et al.* (2004), a equação proposta por Morton combina conceitos de transferência de massa e balanço de energia com o conceito de temperatura de equilíbrio, substituindo a temperatura da água.

O cálculo da evaporação pelo método CRLE é feito pela seguinte fórmula (Fontes *et al.*, 2004; Roque & Sansigolo, 2000):

$$LE = b_1 + b_2 \cdot \frac{\Delta_p}{\Delta_p + \gamma} \cdot (R_{TP}) \quad (11)$$

onde  $b_1 = 13$  e  $b_2 = 1,12$ ,  $\Delta_p$  é a declividade da curva de pressão de vapor na temperatura de equilíbrio (mb/°C) e  $R_{TP}$  é o saldo de radiação na temperatura de equilíbrio ( $W \cdot m^{-2}$ ). Os termos  $b_1$  e  $b_2$  são constantes empíricas obtidas por meio de calibrações realizadas por Morton (1983a), em

diversas regiões do mundo. Maiores detalhes sobre a formulação do método CRLE podem ser encontradas em Morton (1983a e 1983b).

## 5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

A radiação líquida ( $R_n$ ) foi calculada em todos os métodos utilizando-se a informação de insolação das estações climatológicas. O cálculo de  $R_n$  é descrito em detalhes em Allen *et al.* (1998) e Shuttleworth (1993). A seguir, apresentam-se os resultados do cálculo da evaporação com os três métodos e o cálculo do balanço de energia no lago.

### 5.1 – Cálculo da evaporação

No cálculo da evaporação com o método do balanço de energia, em cada uma das oito estações de amostragem foi calculada a taxa de variação de entalpia do lago e, em seguida, determinou-se o valor médio representativo de todo o lago. Os demais dados necessários para a implementação desse método são a temperatura do ar, insolação e umidade relativa, as quais foram obtidas das séries das estações climatológicas de Remanso e Sobradinho. Para o cálculo da razão de Bowen (equação 2), é necessário, ainda, o valor da temperatura da água na superfície do lago ( $T_s$ ), que foi determinada fazendo a média da temperatura da água na superfície de todas as 22 estações de amostragem (Figura 2).

Ainda com relação à aplicação do método do balanço de energia, vale lembrar que o intervalo de tempo entre as medições de perfil de temperatura foi de três meses. Logo, tanto a taxa de variação da entalpia ( $D$ ), como a advecção de entalpia ( $F_i - F_o$ ) e a razão de Bowen ( $\beta$ ) apresentam valores a cada três meses. Entretanto, é possível calcular o valor da radiação líquida em nível mensal. Dessa forma, na aplicação da equação 5,  $R_n$  varia mensalmente, enquanto  $D$ ,  $F_i - F_o$  e  $\beta$  variam a cada três meses.

As Figuras 5 e 6 mostram a variação mensal da evaporação calculada com os três métodos utilizando-se, respectivamente, dados das estações de Remanso e Sobradinho. A Tabela 3 mostra o resumo dos valores de evaporação calculados, bem como a comparação dos métodos de Penman e CRLE com o método do balanço de energia, ou seja, o erro dado pela expressão:

$$\Delta E = \frac{E_{BE} - E}{E_{BE}} \quad (12)$$

onde  $E_{BE}$  é a evaporação calculada com o balanço de energia e  $E$  a evaporação calculada com os métodos de Penman e CRLE.

Tabela 3 – Resumo da evaporação anual em Sobradinho no período entre out/01 e mar/03

Estação	Balanco de energia	Penman		CRLE	
	E (mm)	E (mm)	$\Delta E$ (%)	E (mm)	$\Delta E$ (%)
Remanso	2.238	2.154	3,73	2.187	2,28
Sobradinho	2.041	2.291	-12,24	2.041	0,00

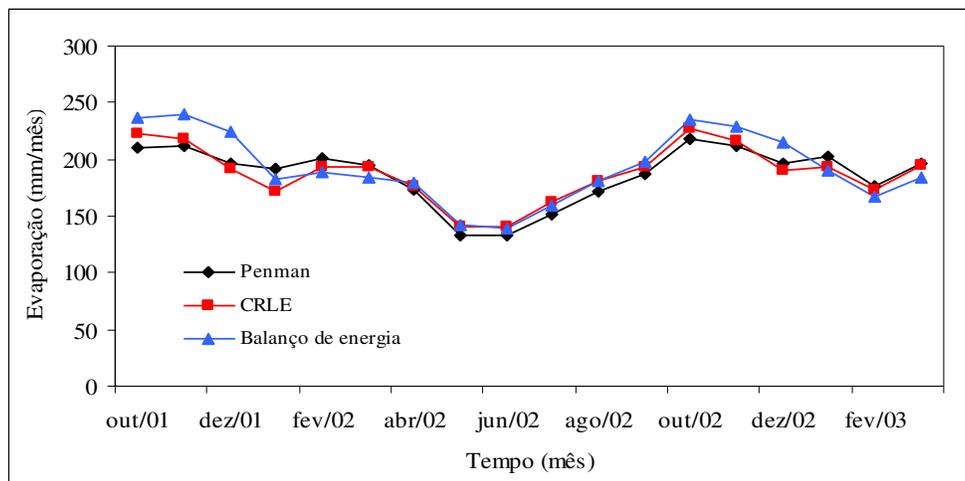


Figura 5 – Evaporação calculada com dados da estação de Remanso.

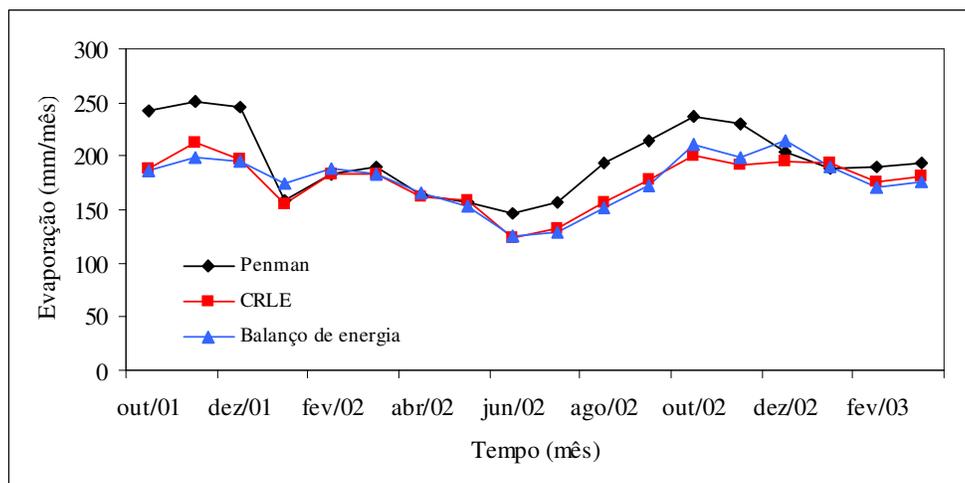


Figura 6 – Evaporação calculada com dados da estação de Sobradinho.

## 5.2 – Balanço de energia do lago

O balanço de energia em um lago é dado pela determinação dos termos da equação 1 apresentada anteriormente. A radiação líquida ( $R_n$ ) foi estimada com dados de insolação das estações climatológicas, LE foi determinado com a equação 5, H e  $\beta$  com a equação 2, D com a equação 6 e  $F_o-F_i$  com a equação 7. Somente o fluxo de calor através do fundo do lago (G) não foi estimado.

Na Tabela 4, estão listados todos os termos do balanço de energia, no período de outubro de 2001 a abril de 2003 calculados com a estação climatológica de Sobradinho. Como foram utilizadas

oito estações de amostragem no interior do lago, os valores listados referem-se à média dessas estações. A Figura 7 mostra a variação temporal da entalpia e da advecção da entalpia no período de análise. Verifica-se que há coerência no comportamento desses termos, pois, quando a entalpia é positiva (quando o lago ganha energia) a advecção da entalpia ( $F_o-F_i$ ) é negativa, ou seja, a energia que sai é inferior à energia que entra.

Tabela 4 – Termos do balanço de energia calculados com a estação de Sobradinho

Período	$R_n$ ( $W.m^{-2}$ )	LE ( $W.m^{-2}$ )	H ( $W.m^{-2}$ )	D ( $W.m^{-2}$ )	$F_o-F_i$ ( $W.m^{-2}$ )	$\beta$
Out/01	177,95	169,84	10,94	0,02	-2,84	0,06
Nov/01	194,75	185,62	11,95	0,02	-2,84	0,06
Dez/01	186,30	177,68	11,44	0,02	-2,84	0,06
Jan/02	170,33	159,59	11,00	2,09	-2,35	0,07
Fev/02	202,85	190,02	13,10	2,09	-2,35	0,07
Mar/02	178,12	166,88	11,50	2,09	-2,35	0,07
Abr/02	159,36	155,31	11,20	-9,44	2,30	0,07
Mai/02	142,15	139,26	10,04	-9,44	2,30	0,07
Jun/02	119,21	117,86	8,50	-9,44	2,30	0,07
Jul/02	122,47	117,38	4,10	3,20	-2,21	0,03
Ago/02	144,04	138,21	4,83	3,20	-2,21	0,03
Set/02	169,46	162,78	5,69	3,20	-2,21	0,03
Out/02	186,28	191,74	-9,82	8,84	-4,48	-0,05
Nov/02	182,10	187,34	-9,60	8,84	-4,48	-0,05
Dez/02	189,74	195,39	-10,01	8,84	-4,48	-0,05
Jan/03	187,97	173,03	12,98	-1,21	3,18	0,08
Fev/03	186,24	171,41	12,86	-1,21	3,18	0,08
Mar/03	174,12	160,14	12,02	-1,21	3,18	0,08

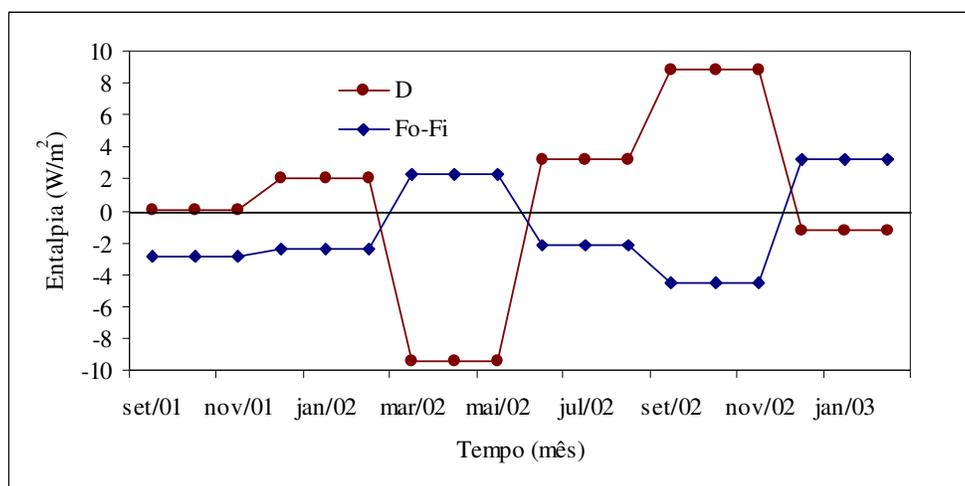


Figura 7 – Variação da entalpia (D) e do calor advecado ( $F_o - F_i$ )

### 5.3 – Discussão dos resultados

Na comparação dos resultados dos três métodos utilizados (Figuras 5 e 6 e Tabela 3), verifica-se boa semelhança nos resultados obtidos. Tomando-se o método do balanço de energia como

referência, constata-se que o método CRLE apresenta melhor desempenho. O método de Penman apresentou resultado semelhante apenas com os dados da estação de Remanso. Em Sobradinho, a evaporação calculada com o método de Penman foi 12% superior às demais. Vallet-Coulomb *et al.* (2001) afirmam que a estimativa de evaporação em lagos com passo de tempo mensal com o método de Penman tem resultado em um erro de aproximadamente 10% quando comparado com os métodos do balanço de energia e balanço hídrico.

Comparando-se com outros trabalhos realizados com dados da estação de Sobradinho, verifica-se que o valor da evaporação anual calculada com o método do balanço de energia está próximo do obtido por Acioli *et al.* (1992) (CRLE), Chesf (1992) e Pereira (2004) (tanque classe A) conforme mostrado na Tabela 2. Nos resultados referentes à estação de Remanso, apenas a evaporação calculada por Dias (1986) apresenta valor próximo ao determinado pelo método do balanço de energia.

Por meio da Tabela 4, verifica-se que o calor latente (LE), termo associado ao processo de evaporação, é responsável pela maior proporção de radiação que compõe o balanço de energia no lago de Sobradinho. O valor desse termo nunca é inferior a 90% da radiação líquida. Com respeito à relação entre calor latente e calor sensível, verifica-se por meio da razão de Bowen que o calor sensível varia entre 3,0% e 8,0% do valor do calor latente.

Diante desses resultados, percebe-se que tanto a taxa de variação da entalpia como o calor advectado possuem pequena influência sobre o balanço de energia do lago e o termo que exerce maior influência é o calor latente. A entalpia estimada é bastante inferior à encontrada em outros lagos como, por exemplo, Itaipu e Foz do Areia no Estado do Paraná (Dias & Rocha, 1999). Em Itaipu e Foz do Areia, a taxa de variação da entalpia ultrapassa  $100 \text{ W.m}^{-2}$  entre os meses de abril e maio.

Os baixos valores da taxa de variação da entalpia e da advecção da entalpia podem ser explicados pela baixa variação da temperatura ao longo do ano. Enquanto em Itaipu e Foz do Areia, a temperatura da superfície da água apresenta amplitude anual em torno de  $10^{\circ}\text{C}$ , a amplitude da temperatura da superfície da água verificada em Sobradinho é inferior a  $3^{\circ}\text{C}$ .

## 6 – CONCLUSÕES

O balanço de energia é um dos mais eficientes métodos de cálculo da evaporação em lagos. Em virtude de seu embasamento físico, ele pode ser considerado como uma referência para os demais métodos, principalmente, se todos os termos do balanço forem considerados (a exemplo deste trabalho). Os resultados da aplicação dos métodos de cálculo da evaporação mostraram que o método CRLE apresenta valores mais próximos aos obtidos com o método do balanço de energia. O

método de Penman, principalmente na estação de Sobradinho, apresentou resultados mais discrepantes.

Reportando-se aos valores da Tabela 2, verifica-se que o método CRLE apresenta resultados coerentes entre os trabalhos já realizados. Este trabalho reforça a constatação do bom desempenho desse método na estimativa da evaporação no lago de Sobradinho. A vantagem de seu uso com relação ao método do balanço de energia diz respeito ao menor número de informações necessárias. Além da temperatura do ar, insolação e umidade relativa utilizados no CRLE, o balanço de energia exige, ainda, que se disponha de perfis de temperatura da água no lago. Em lagos extensos como no caso de Sobradinho, que possui 4.214 km<sup>2</sup> de área, o levantamento dessa informação requer grande soma de recursos e tempo.

Uma alternativa para a aplicação do método do balanço de energia consiste no descarte dos termos referentes à taxa de variação da entalpia (D) e advecção da entalpia ( $F_o - F_i$ ). Conforme mostrado na Tabela 4, esses termos exercem pequena influência no balanço de energia e, por esse motivo, podem ser desprezados. Tanto em Remanso quanto em Sobradinho, a diferença da evaporação calculada com e sem entalpia é de menos de 1,0%. Assim, restaria apenas conhecer a razão de Bowen (equação 2), que é determinada com a temperatura da superfície da água. Nesse caso, para se evitar a medição da temperatura da superfície da água de forma rotineira, uma possibilidade é utilizar a razão de Bowen constante a exemplo do realizado por Vallet-Coulomb *et al.* (2001) no lago Ziway, na Etiópia.

Nesse caso, um maior período de dados seria necessário para se chegar a um valor confiável para  $\beta$ . Nos cálculos realizados, observou-se que a razão de Bowen varia bastante ao longo do ano tanto em magnitude como no valor do sinal (negativo ou positivo).

Novas campanhas de monitoramento estão sendo realizadas pelo DEPESCA/UFRPE no âmbito do projeto “Monitoramento limnológico e da produção pesqueira do reservatório de Sobradinho”. Esta nova etapa do projeto possui 19 estações de monitoramento. Nas novas campanhas, a temperatura da água está sendo medida com intervalo de 01 metro, da superfície até o fundo. Com as novas medições será possível levantar novas informações relativas ao comportamento térmico do lago de Sobradinho e, conseqüentemente, avaliar a influência desse comportamento sobre o processo de evaporação.

## **AGRADECIMENTOS**

Os autores agradecem ao Departamento de Pesca da Universidade Federal Rural de Pernambuco na pessoa do Prof. Dr. William Severi, à Divisão de Meio Ambiente e à Divisão de Gestão de Recursos Hídricos da Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (Chesf) pela disponibilização dos dados de temperatura da água do lago de Sobradinho e séries das estações

fluviométricas. O primeiro autor agradece à Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pela concessão de bolsa de Desenvolvimento Científico Regional.

## BIBLIOGRAFIA

ACIOLI, G. *et al.* (1992). “*Estimação de taxas de evaporação no reservatório de Sobradinho*”. Recife, 1992. Não paginado. Relatório Técnico (Chesf-RT-DOCH-014-92).

ACIOLI, G.C.L. *et al.* (2004). “*Vetores de evaporação líquida para o reservatório de Sobradinho*” in Anais do VII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, São Luiz, CD-ROM.

ALLEN, R.G. *et al.* (1998). *Crop Evapotranspiration – guidelines for computing crop water requirements*. FAO Roma, 300 p. (Irrigation and Dranaige Paper, 56).

ASSOULINE, S.; MAHRER, Y. (1993). “*Evaporation from Lake Kinneret. I: eddy correlation system measurement sand energy budget estimates*”. Water Resources Research 29(4), pp. 901–910.

CHESF (1992). “*Cálculo de Evaporação - Método de Morton*”. Recife, Não paginado. Nota Técnica (NT-DOCH-009/92).

CHESF (2006). Companhia Hidro Elétrica do São Francisco. Disponível em: <<http://www.chesf.gov.br>>.

CODEVASF (2006). Companhia de desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba. Disponível em <<http://www.codevasf.gov.br>>.

DANTAS, C.E.O. (2005). *Análise dos efeitos dinâmicos em reservatórios de grande extensão - estudo de caso: reservatório de Sobradinho*. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 72p.

DIAS, N.L. & ROCHA, L.S. (1999). “*Cálculo da taxa de variação da entalpia para os lagos de Itaipu e Foz do Areia*”. Revista Brasileira de Recursos Hídricos 4(3), pp. 39-51.

DIAS, N.L.C. (1986). *Estimativas climatológicas de evaporação em lagos*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 175p.

ESTEVES, F.A. (1998). *Fundamentos de limnologia*. Ed. Interciência/FINEP Rio de Janeiro-RJ, 575p.

FADURPE (2002). Fundação Apolônio Salles de Desenvolvimento Educacional. Departamento de Pesca da Universidade Federal Rural de Pernambuco. “*Monitoramento limnológico e da produção pesqueira do reservatório de Sobradinho*”. Recife, 32p. (Relatório de atividades)

- FONTES, A.S. *et al.* (2004). “Avaliação preliminar da evaporação nos açudes da bacia experimental do Rio Cedro”. Disponível em: < www.grh.ufba.br >.
- MORTON, F. I. (1983a). “Operational estimates of areal evapotranspiration and their significance to the science and practice of hydrology”. *Journal of Hydrology* 66(114), pp. 1-76.
- MORTON, F.I. (1983b). “Operational estimates of lake evaporation”. *Journal of hydrology* 66(1-4), pp. 77-100.
- ONS (2003). Operador Nacional do Sistema Elétrico. “Balanço Hídrico do Reservatório de Sobradinho - Caracterização do Problema”. Rio de Janeiro, 21p. (Nota Técnica, NT-040-100-2003).
- PEREIRA, S.B. (2004). *Evaporação no lago de Sobradinho e disponibilidade hídrica no rio São Francisco*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 105p.
- REIS, R.J. & DIAS, N.L. (1998). “Multi-season lake evaporation: energy-budget estimates and CRLE model assessment with limited meteorological observations”. *Journal of Hydrology* 208 (3-4), pp. 135-147.
- ROQUE, R.O. & SANSIGOLO, C.A. (2000). “Estimativas de evapotranspiração regional em Presidente Prudente, SP, usando o modelo conceitual de relação complementar de Morton”. *Revista Brasileira de Agrometeorologia* 8(2), pp. 199-205.
- SHUTTLEWORTH, W.J. (1993). “Evaporation”, in *Handbook of Hydrology*. Ed. Por MAIDMENT, D.R. ed. McGraw-Hill Inc., New York-EUA, cap. 4.
- TUCCI, C.E.M. e BELTRAME, L.F.S. (2004). “Evaporação e evapotranspiração”, in *Hidrologia-Ciência e Aplicação*. Org. por TUCCI, C.E.M., ABRH, ed. UFRGS/Edusp, Porto Alegre-RS, cap. 7, pp. 253-287.
- VALLET-COULOMB, C. *et al.* (2001). “Lake evaporation estimates in tropical Africa (Lake Ziway, Ethiopia)”. *Journal of Hydrology* 245(1-4), pp. 1-18.
- VAREJÃO-SILVA, M.A. (2005). *Meteorologia e Climatologia*. Recife-PE. Versão Digital.
- WINTER, T.C. *et al.* (1995). “Evaluation of 11 equations for determining evaporation for a small lake in the North Central United-States”. *Water Resources Research* 31(4), pp. 983-993.