

NAYARA PAULA ANDRADE VIEIRA

**ESTIMATIVA DA EVAPORAÇÃO NOS RESERVATÓRIOS DE TRÊS
MARIAS – MG E SOBRADINHO – BA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2015

Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa

T

V657e
2015
Vieira, Nayara Paula Andrade, 1989-
Estimativa da evaporação nos reservatórios de Três Marias -
MG e Sobradinho - BA / Nayara Paula Andrade Vieira. –
Viçosa, MG, 2015.
xviii, 91f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui apêndices.

Orientador: Mauro Aparecido Martinez.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f.72-76.

I. Reservatórios. 2. Evaporação. 3. São Francisco, rio.
I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia
Agrícola. Programa de Pós-graduação em Engenharia Agrícola.
II. Título.

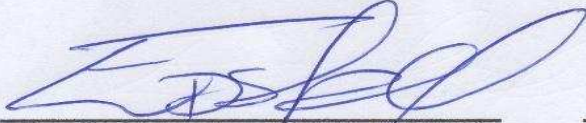
CDD 22. ed. 551.572

NAYARA PAULA ANDRADE VIEIRA

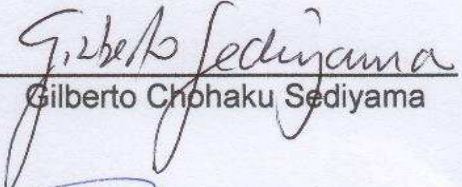
**ESTIMATIVA DA EVAPORAÇÃO NOS RESERVATÓRIOS DE TRÊS
MARIAS – MG E SOBRADINHO – BA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

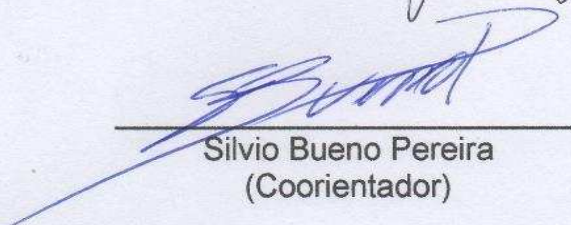
APROVADA: 12 de fevereiro de 2015



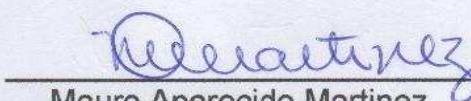
Edson de Oliveira Vieira



Gilberto Chohaku Sedyama



Silvio Bueno Pereira
(Coorientador)



Mauro Aparecido Martinez
(Orientador)

*“Entrega o teu caminho
ao senhor, confia nele ;
e Ele tudo fará.”*

*A Deus
Aos meus pais Jorge e Iara
Aos meus irmãos Maykon e Nayane*

AGRADECIMENTOS

A Deus, razão da minha vida, por ter me dado força para superar os desafios e graça nos momentos de tribulação.

Aos meus pais, Jorge e Iara, que não mediram esforços para a concretização dos meus sonhos, pelo amor incondicional, carinho, confiança e pelas orações.

Aos meus irmãos, Maykon e Nayane, pelo carinho, apoio e por sempre torcerem por mim.

As minhas tias Consuelo, Denise e a dona Divina pelas orações.

A toda família, em especial a minha avó Olinta, pela torcida.

As minhas amigas de república Camila e Rayssa e agregadas, Tarcila e Priscila, pela grande amizade, pelos momentos de alegria, felicidade e por termos nos tornado uma grande família.

Aos amigos do departamento, em especial, Micael, David, Felipe, pela grande amizade, ajuda e companheirismo.

Aos meus orientadores Mauro Aparecido Martinez e Sílvio Bueno Pereira pelo conhecimento transmitido, pela orientação, apoio e paciência.

À Universidade Federal de Viçosa pela oportunidade de realização do curso.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), pela concessão da bolsa de estudo.

Aos funcionários do departamento de Engenharia Agrícola pelo suporte.

Ao estagiário Damásio pela ajuda.

À célula da PIBV que ajudou a fortalecer minha vida espiritual.

As minhas amigas Débora e Geliane, que mesmo de longe sempre me acompanharam.

Aos professores da banca, Edson de Oliveira Vieira e Gilberto Chohaku Sedyama pelas sugestões, em especial ao Edson pela amizade e incentivo.

À CEMIG, CHESF e INMET por terem disponibilizado os dados para realização da pesquisa.

À FAPEMIG que financiou o projeto.

A todos aqueles que, direta ou indiretamente, participaram da realização deste trabalho.

BIOGRAFIA

NAYARA PAULA ANDRADE VIEIRA, filho de Jorge Marques Vieira e lara Paula Andrade Vieira, nasceu em Capim Branco, MG, em 22 de outubro de 1989.

Em março de 2008, ingressou no curso de Agronomia na Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), em Montes Claros, MG, concluindo-o em março de 2013. Durante a graduação, foi bolsista de Extensão Universitária por um ano pelo programa PROEX UFMG e bolsista de monitoria em Estatística por um ano.

Em abril de 2013, ingressou no Programa de Pós Graduação, em nível de Mestrado, no Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa (UFV), na área de concentração em Recursos Hídricos e Ambientais, submetendo-se à defesa de dissertação em fevereiro de 2015.

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS	VIII
LISTA DE TABELAS	X
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
RESUMO.....	XV
ABSTRACT.....	XVII
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1 ESTIMATIVA DA EVAPORAÇÃO EM RESERVATÓRIOS.....	4
2.1.1 <i>Modelo Penman</i>	5
2.1.2 <i>Modelo Linacre</i>	7
2.1.3 <i>Modelo Kohler et al.</i>	9
2.1.4 <i>Modelo Thornthwaite</i>	11
2.1.5 <i>Modelo CRLE</i>	12
2.1.6 <i>Método do Tanque Classe A</i>	19
3. MATERIAL E MÉTODOS	22
3.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	22
3.2 AQUISIÇÃO DE DADOS METEOROLÓGICOS.....	25
3.3 ESTIMATIVA DA EVAPORAÇÃO NO RESERVATÓRIO.....	27
3.3.1 <i>Modelo Penman</i>	28
3.3.2 <i>Modelo Linacre</i>	30
3.3.3 <i>Modelo Kohler et al.</i>	31
3.3.4 <i>Modelo Thornthwaite</i>	32
3.3.5 <i>Modelo CRLE</i>	33
3.3.6 <i>Tanque Classe A</i>	40
3.4 ESTIMATIVA DA VAZÃO EQUIVALENTE A LÂMINA EVAPORADA	41
3.5 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE.....	41
3.6 COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS	42
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
4.1 CARACTERIZAÇÃO CLIMÁTICA DA REGIÃO DOS RESERVATÓRIOS.....	44

4.2	EVAPORAÇÃO NOS RESERVATÓRIOS DE SOBRADINHO – BA E TRÊS MARIAS – MG	46
4.3	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DOS MODELOS PENMAN, LINACRE, KOHLER ET AL., THORNTHWAITE E CRLE, AOS PARÂMETROS CLIMÁTICOS RELATIVOS À INSOLAÇÃO, TEMPERATURA DO AR, PRECIPITAÇÃO E VELOCIDADE DO VENTO 55	
4.4	VAZÃO EQUIVALENTE A LÂMINA EVAPORADA NOS RESERVATÓRIOS RELATIVOS AOS MODELOS PENMAN, LINACRE, KOHLER ET AL., THORNTHWAITE, CRLE, E AO MÉTODO DO TANQUE CLASSE A	61
4.5	COMPARAÇÃO ENTRE AS EVAPORAÇÕES ESTIMADAS POR DIFERENTES ESTAÇÕES METEOROLÓGICAS	65
5.	CONCLUSÕES.....	70
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	72
	APÊNDICES.....	77

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Representação esquemática da relação complementar entre a evapotranspiração real (ETR) e a potencial (ETP), para um constante suprimento de energia radiante.	14
Figura 2 - Representação esquemática da relação entre as evaporações do lago (EW) e potencial (EP) no ambiente de terrestre com constante fornecimento de energia radiante.	15
Figura 3 - Evaporação obtida por evaporímetros em três campos cultivados com algodão.	17
Figura 4 - Localização espacial dos reservatórios de Sobradinho e Três Marias na bacia do Rio São Francisco.	24
Figura 5 - Localização geográfica das Estações no reservatório de Sobradinho e Três Marias e no entorno das barragens.	26
Figura 6 - Variação da precipitação (a), temperatura média (b), insolação (c) e velocidade do vento (d) na estação Sobradinho – BA, considerando-se o período de 1980 a 2012 e na estação Três Marias – MG para o período 2000, 2001 e 2002.	45
Figura 7 - Evaporação mensal média (mm) no reservatório de Sobradinho para o período de 1980 a 2012 estimada pelos modelos Penman, Linacre, Kohler et al., Thornthwaite e CRLE e pelo método do tanque Classe A.	47
Figura 8 - Evaporação mensal média (mm) no reservatório de Três Marias estimada pelos modelos Penman, Linacre, Kohler et al., Thornthwaite e CRLE, para os períodos de 2000, 2001 e 2002.	52
Figura 9 - Análise de sensibilidade relativa dos modelos Penman, Linacre, Kohler et al., Thornthwaite e CRLE aos parâmetros climáticos: insolação (a), temperatura do ar (b), precipitação (c) e velocidade do vento (d). ..	59
Figura 10 - Vazão evaporada ($m^3 s^{-1}$) no reservatório de Sobradinho – BA estimada pelos modelos Penman, Linacre, Kohler et al., Thornthwaite e CRLE e pelo método do tanque Classe A para os períodos de 1980 a 2012.	62

Figura 11 - Vazão evaporada ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) no reservatório de Três Marias – MG estimada pelos modelos Penman, Linacre, Kohler et al., Thornthwaite e CRLE, para os períodos de 2000, 2001 e 2002.....	64
Figura 12 – Comparação entre as evaporações estimadas pela estação localizada no reservatório de Sobradinho – BA com a média das estações localizadas ao entorno para os modelos: Penman (a), Linacre (b), Kohler et al. (c), Thornthwaite (d) e CRLE (e).	66
Figura 13 - Comparação entre as evaporações estimadas pela estação localizada no reservatório de Três Marias – MG com a média das estações localizadas ao entorno para os modelos: Penman (a), Linacre (b), Kohler et al. (c), Thornthwaite (d) e CRLE (e).	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Estações meteorológicas utilizadas	25
Tabela 2 - Período de dados considerados na análise	27
Tabela 3 - Evaporação anual (mm) no reservatório de Sobradinho estimada pelo método do Tanque Classe A e pelos modelos Penman, Linacre, Kohler et al., Thornthwaite e CRLE para o período de 1980 a 2012	49
Tabela 4 - Valores de $\hat{\beta}_1$ estimados a partir da comparação entre cada modelo, por meio da equação da reta $\hat{Y} = \hat{\beta}_1 X$, para o reservatório de Sobradinho – BA	50
Tabela 5 - Evaporação anual (mm) no reservatório de Três Marias pelos modelos Penman, Linacre, Kohler et al., Thornthwaite, e CRLE, para o período de 2000, 2001 e 2002	53
Tabela 6 - Valores de $\hat{\beta}_1$ estimados a partir da comparação entre cada modelo, por meio da equação da reta $\hat{Y} = \hat{\beta}_1 X$, para o reservatório de Três Marias – MG	54
Tabela 7 - Índice de sensibilidade (IS) dos modelos Penman, Linacre, Kohler et al., Thornthwaite, e CRLE aos parâmetros climáticos: insolação, temperatura, precipitação e velocidade do vento	56
Tabela 8 - Vazão média anual evaporada no reservatório de Sobradinho - BA, estimada com o uso dos modelos Penman, Linacre, Kohler et al., Thornthwaite, CRLE e pelo método do tanque Classe A (ECA $k_p=0,6$)	61
Tabela 9 - Vazão média anual evaporada no reservatório de Três Marias - MG, estimada com o uso dos modelos Penman, Linacre, Kohler et al., Thornthwaite e CRLE	63

LISTA DE SÍMBOLOS

- E_{TR} = evapotranspiração real ou regional, mm por mês.
- E_{TP} = evapotranspiração potencial, mm por mês.
- E_{TW} = evapotranspiração de equilíbrio, mm por mês.
- E_L = evaporação no lago, mm por mês.
- T = temperatura média do ar mensal, °C.
- h = altitude do local, m.
- ϕ = latitude local, graus.
- T_d = temperatura média mensal do ponto de orvalho, °C.
- Q_{ir} = diferença entre radiação solar incidente e refletida, mm d⁻¹.
- ε = constante de emissividade igual a 0,92.
- σ = constante de Stefan-Boltzmann igual a $4,903 \cdot 10^{-9}$ MJ K⁻⁴m⁻² d⁻¹.
- T_a = temperatura média do ar, K.
- Δ = declividade da curva de pressão de saturação de vapor, kPa °C⁻¹.
- γ = coeficiente psicrométrico igual a $0,665 \cdot 10^{-3}$ kPa °C⁻¹.
- $f(u)$ = coeficiente de transporte de vapor d'água.
- P_m = Precipitação total mensal, mm.
- E_a = poder evaporante do ar, mm d⁻¹.
- U = velocidade do vento, km d⁻¹.
- e_s = pressão de saturação de vapor a 2 m de altura, kPa.
- e_a = pressão parcial de vapor a 2 m de altura, kPa.
- ECA = evaporação no tanque classe A, mm por mês.
- I = índice de calor da região.
- k_p = coeficiente do tanque Classe A.

- E_s = componente de evaporação devido ao ciclo de aquecimento, mm por mês.
- E_a = componente de evaporação devido ao vento, mm por mês.
- R_n = radiação líquida, $W m^{-2}$.
- ρ = densidade da água.
- R_{ns} = saldo de radiação de ondas curtas, $W m^{-2}$.
- R_{nl} = saldo de radiação de ondas longas, $W m^{-2}$.
- α = albedo.
- R_s = radiação solar global, $W m^{-2}$.
- a_s+b_s = fração da radiação extraterrestre que chega a terra em dias.
- n = insolação, h.
- N = duração máxima diária de brilho solar, h.
- T_{kx} = temperatura máxima, K.
- T_{kn} = temperatura mínima, K.
- R_{so} = radiação solar para dias sem nuvens, $MJ m^{-2} d^{-1}$.
- R_a = radiação extraterrestre, $MJ m^{-2} d^{-1}$.
- E_w = evaporação no lago, mm por mês.
- P = pressão atmosférica na localidade considerada, mb.
- P_s = pressão atmosférica ao nível do mar, mb.
- Δ_p = declividade da curva de pressão de saturação de vapor na temperatura de equilíbrio, $mb ^\circ C^{-1}$.
- R_{TP} = saldo de radiação na temperatura de equilíbrio, $W m^{-2}$.
- u = pressão de vapor de saturação na temperatura média do ar, mb.
- E_P = evaporação potencial, mm por mês.
- f_w = coeficiente de transferência de vapor, adimensional.
- T_P = temperatura de equilíbrio da subcamada de ar próxima à superfície, $^\circ C$.

- ζ = fator de estabilidade.
- f_z = constante para cálculo de evaporação em lagos, igual a $25,0 \text{ W m}^{-2} \text{ mb}^{-1}$.
- u_D = pressão de vapor de saturação na temperatura do ponto de orvalho, mb.
- R_W = saldo de radiação na temperatura do ar, W m^{-2} .
- δT_p = correção de T'_p no processo iterativo.
- T'_p = conjunto de valores de T_p no processo iterativo.
- u_p = pressão de vapor de saturação na temperatura de equilíbrio, mb.
- a = albedo médio.
- G = radiação solar incidente, W m^{-2} .
- B = perda de radiação de ondas longas pela superfície solo-planta na temperatura do ar, W m^{-2} .
- S = razão entre a duração do brilho solar observado e a máxima duração de brilho solar possível, adimensional.
- Z = ângulo zenital ao meio-dia.
- G_0 = radiação solar à superfície para céu claro, W m^{-2} .
- G_E = radiação solar no topo da atmosfera, W m^{-2} .
- τ = transmitância do céu claro para a radiação solar direta.
- τ_a = fração absorvida da transmitância de céu claro.
- a_0 = albedo para dia de céu claro.
- η = raio vetor do sol.
- ω = deslocamento angular da terra do meio-dia ao por do sol.
- z = ângulo zenital médio diário.
- i = número do mês do ano.
- j = coeficiente de turbidez, adimensional.
- ω' = vapor de água precipitável.
- θ = declinação do sol.

- ρ = incremento na radiação atmosférica devido às nuvens.
- λ = coeficiente de transferência de calor.
- R_s = radiação solar na superfície do lago, $W\ m^{-2}$.
- F = fator de correção devido à altitude do local, adimensional.
- u_2 = velocidade média do vento a 2 m de altura, $m\ s^{-1}$.
- R_a = radiação solar extraterrestre, $W\ m^{-2}$.
- C_m = média do número de décimos do céu ocupado pela nuvem no momento da observação.
- γ_L = coeficiente psicrométrico corrigido, $kPa\ ^\circ C^{-1}$.
- R_n = saldo de radiação solar, em equivalente de lâmina de água evaporada, $mm\ d^{-1}$.
- Q_{ev} = vazão média equivalente a lâmina evaporada no reservatório, $m^3\ s^{-1}$.
- E_v = taxa de evaporação no reservatório, $m\ dia^{-1}$.
- A_r = área de acumulação do reservatório média mensal, m^2 .
- IS = índice de sensibilidade do modelo.
- β_1 = coeficiente angular da reta.
- β_0 = constante da equação de regressão.

RESUMO

VIEIRA, Nayara Paula Andrade, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, Fevereiro de 2015. **Estimativa da evaporação nos reservatórios de Três Marias – MG e Sobradinho – BA.** Orientador: Mauro Aparecido Martinez. Coorientadores: Silvio Bueno Pereira e Demetrius David da Silva.

A evaporação é um dos principais processos envolvidos no balanço hídrico e de calor. Estudos que possibilitem a obtenção de estimativas precisas de evaporação em reservatórios representam uma importante ação para o adequado gerenciamento e manejo dos recursos hídricos. Dessa forma, objetivou-se estimar a evaporação, a partir da aplicação dos modelos matemáticos Penman, Linacre, Kohler et al., Thornthwaite e Complementary Relationship Lake Evaporation – CRLE e pela metodologia do Tanque Classe A, nos reservatórios de Sobradinho e de Três Marias, localizados no rio São Francisco; e verificar se estações meteorológicas localizadas ao entorno dos reservatórios podem ser utilizadas para prever a evaporação. Para alcançar os objetivos foram obtidas séries históricas de dados meteorológicos das estações localizadas nos reservatórios e nas cidades vizinhas. Por meio dos modelos Penman, Linacre, Kohler et al., Thornthwaite, CRLE e pelo método do tanque Classe A (com coeficientes de tanque de 0,4, 0,6 e 0,8) foi possível estimar a evaporação nos reservatórios. A comparação entre os modelos foi feita aplicando-se teste “t” ao nível de 5% de probabilidade. Foi realizada análise de sensibilidade dos modelos aos dados meteorológicos de entrada e teste do parâmetro β_1 , por meio do teste “t”, para comparar as evaporações estimadas pelas diferentes estações. As lâminas evaporadas foram convertidas em vazão evaporada para verificar a quantidade de água que deixa de passar pelas turbinas geradoras de energia. Os resultados permitiram constatar que: a) a evaporação média anual no reservatório de Sobradinho estimada pelo modelo de Penman foi de 2.108 mm e no reservatório de Três Marias foi de 1.615 mm; b) em relação ao modelo de Penman, o modelo Linacre superestima a evaporação para os dois reservatórios; c) os modelos Kohler et al. e Thornthwaite subestimam a evaporação, em relação a Penman, para os dois reservatórios; d) o único modelo que apresenta sensibilidade à

precipitação é Linacre; e) a vazão média decorrente da evaporação para o reservatório de Sobradinho e Três Marias é $203 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e $39 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, respectivamente, e; f) As estações meteorológicas localizadas no reservatório, estimam evaporações estatisticamente diferentes daquelas obtidas pelas estações ao entorno dos reservatórios de Sobradinho e Três Marias, com exceção do modelo Kohler et al. em Sobradinho, e do modelo Linacre em Três Marias.

ABSTRACT

VIEIRA, Nayara Paula Andrade, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2015. **Três Marias – MG and Sobradinho – BA reservoir evaporation estimates**. Adviser: Mauro Aparecido Martinez. Co-advisers: Silvio Bueno Pereira and Demetrius David da Silva.

Evaporation is one of the main processes involved in the water balance and in the thermal stratification in reservoirs. Studies that permit the obtainment of precise reservoir evaporation estimates are important for the correct administration and management of the water resources. Therefore evaporation estimates were made by applying various mathematical models to measure the evaporation of the Sobradinho Reservoir and the Três Marias Reservoir located in the São Francisco River: Penman, Linacre, Kohler et al., Thornthwaite, Complementary Relationship Lake Evaporation – CRLE, and by the Class A pan evaporation methodology. These estimates were also used to verify the evaporation prediction capability of the meteorological stations near the reservoirs. Historical records of meteorological data of these stations were found in the reservoirs and in the nearby cities. By means of the Penman, Linacre, Kohler et al., Thornthwaite, and CRLE models; and the Class A pan methodology (with pan coefficients of 0,4, 0,6, and 0,8) it was possible to estimate the reservoirs' evaporation. The comparison between the models was made by applying the t -test at the significance level of 0.05. The sensitivity analysis of the models to the entered meteorological data and the β parameter estimation, by means of the t -test, were realized to compare the evaporation estimates of the stations. The evaporate depths were converted into evaporated flow to verify the amount of water that does not pass through the power generating turbines. The results allowed for the following to be determined: a) in relation to the Penman model, the annual average evaporation of the Sobradinho Reservoir was of 2.108 mm and of the Três Marias Reservoir was of 1.615 mm; b) in relation to the Penman model, the Linacre model overestimates the evaporation for both of the reservoirs; c) the Kohler et al. and the Thornthwaite models underestimate the evaporation in relation to the Penman model for both of the reservoirs; d) only the Linacre model presents

sensitivity to the precipitation; e) the average flow corresponding to the evaporation of the reservoirs are respectively of $203 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ and of $39 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ for the Sobradinho Reservoir and the Três Marias Reservoir; and f) the meteorological stations located on the lakes estimated evaporation rates statistically different from those obtained from the stations nearby the Sobradinho and the Três Marias lakes, with the exception of the Kohler et al. model in the Sobradinho Reservoir, and the Linacre model in the Três Marias Reservoir.

1. INTRODUÇÃO

Em reservatórios e lagos a evaporação é um dos principais processos envolvidos no balanço hídrico e de calor. Para a melhor compreensão da dinâmica do clima, em nível local regional e global, é necessária uma quantificação acurada da evaporação.

No planejamento e gerenciamento de recursos hídricos assim como em estudos de impacto ambiental, estimativas confiáveis da evaporação em reservatórios são de extrema relevância. Os planejadores de recursos hídricos consideram o processo como “perda” pelo significativo volume de água que passa para a atmosfera, sendo importante sua obtenção tanto na fase de elaboração do projeto quanto no decorrer do período de operação do reservatório (DIAS; KELMAN, 1987). Kan e Dias (1999) salientam a importância de tais valores por permitir avaliar a quantidade de água que se perde com a construção de um reservatório.

Um fator de grande importância na análise da vazão máxima permissível para a concessão de outorga se refere às perdas de água por evaporação nos reservatórios de regularização (PEREIRA et al., 2009). Nas usinas hidrelétricas o montante de água evaporada que deixa de passar diariamente pelas turbinas geradoras de energia promovem significativas perdas no setor elétrico.

A determinação do volume disponível do reservatório, para os diversos usos, depende de um criterioso conhecimento das perdas por evaporação, informação de suma importância para políticas de manejo dos recursos hídricos, gestão, operação dos reservatórios e garantia ao atendimento das demandas de água. Não só a quantidade, mas também a qualidade da água disponível nos reservatórios pode ser afetada pela maior concentração de poluentes (FONTES, 2005).

A taxa de evaporação varia principalmente em função de forçantes meteorológicas como temperatura do ar, radiação solar, velocidade do vento, pressão atmosférica, umidade relativa bem como com as características físicas do reservatório. Assim, o uso desses parâmetros aplicadas no estudo da variação temporal da evaporação permite uma melhor estimativa das perdas anuais de água.

No Brasil, são escassas as atividades de pesquisa e experimentação no campo específico da evaporação em reservatórios, além da incontestável carência de informações básicas nas diferentes regiões climáticas do país para atender aos diversos objetivos (PEREIRA, 1997). Estudos que utilizam o método do balanço hídrico como padrão se torna muitas vezes inviável em função da dimensão do lago, o que dificulta a contabilização das entradas e saídas. Medir a evaporação por meio de um tanque Classe A instalado no centro do reservatório é complicado, já que esse aparelho de medida muitas vezes encontra-se nas estações meteorológicas que margeiam dos mesmos. Como a medida da evaporação real de superfícies de lagos e reservatórios é difícil de ser efetuada diretamente, Simon e Mero (1985) afirmam que é imprescindível estimá-la usando-se aproximações.

O rio São Francisco, que representa um importante indutor do desenvolvimento de diversos estados situado na região Nordeste, possui vários afluentes que contribuem com uma grande disponibilidade hídrica, sendo bem aproveitados pela irrigação e pelo seu potencial hidrelétrico. São várias as usinas hidrelétricas instaladas no rio, nos quais destacam-se as de Três Marias e Sobradinho pela função de regularização do São Francisco e geração de energia elétrica.

Diante do exposto, percebe-se a relevância e a necessidade de estimativas mais atualizadas e precisas da evaporação em dois dos principais reservatórios localizados no rio São Francisco, visando o gerenciamento desse recurso de extremo valor econômico, social, político e ambiental, no cenário nacional.

Neste contexto, os objetivos deste trabalho foram:

- Estimar a evaporação, a partir da aplicação dos modelos matemáticos Penman, Linacre, Kohler et al., Thornthwaite e Complementary Relationship Lake Evaporation - CRLE e pela metodologia do Tanque Classe A na estimativa da evaporação, nos reservatórios de Sobradinho, Bahia, e de Três Marias, Minas Gerais, localizados no rio São Francisco.
- Comparar as evaporações estimadas pelos diferentes modelos aplicados e comparar as evaporações estimadas com aquela estimada usando o modelo de Penman, tomado como referência.

- Analisar a sensibilidade da evaporação média anual estimada aos parâmetros de entrada dos modelos.
- Comparar as evaporações estimadas a partir de dados de estações meteorológicas localizadas no reservatório com aquelas oriundas de estações localizadas ao entorno do reservatório.
- Obtenção da vazão média equivalente a lâmina evaporada nos dois reservatórios.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Estimativa da evaporação em reservatórios

A evaporação é um processo complexo que envolve o transporte simultâneo de massa e de energia (DIAS, 1986 citado por FONTES, 2005). A mudança de fase é um processo físico reversível que depende da energia interna do sistema na forma de calor sensível. Assim, a evaporação representa o resfriamento do ambiente, ou seja, a transformação do calor sensível em calor latente representando a redistribuição da energia solar absorvida (PEREIRA et al., 2013). Como a evaporação é um dos principais componentes do ciclo hidrológico e do balanço hídrico, Chin e Zhao (1995), afirmam que seu estudo é de fundamental importância.

A estimativa da evaporação, pode ser realizada pela utilização de modelos fundamentados no balanço de energia, nos processos de transferência, balanço hídrico, métodos aerodinâmicos e métodos combinados por meio de formulações empíricas ou semi-empíricas, e pelos tanques de evaporação (LEÃO et al., 2013). Segundo Oliveira (2009), os métodos baseados no balanço de energia, os aerodinâmicos e os combinados são muito utilizados, sendo, muitos deles, derivados de um método ou de uma equação que serve de alicerce, como o que ocorre com as equações de Dalton e de Penman. Já as formulações empíricas ou semi-empíricas são comuns não só para determinar os diferentes coeficientes para os modelos teóricos, mas também para a parametrização dos modelos evaporimétricos.

Um dos principais problemas na utilização de modelos na estimativa da evaporação é a falta de monitoramento dos dados meteorológicos sobre a superfície do reservatório, bem como medições dos perfis da temperatura da água, que informam a energia armazenada no corpo d'água, responsável por parte da evaporação (FONTES, 2005). Dessa forma, a maioria dos métodos disponíveis estima a evaporação a partir de observações de temperatura, umidade relativa do ar, velocidade do vento e radiação solar ou utiliza medidas de tanques de evaporação alocados em estações meteorológicas no ambiente terrestre (REIS; DIAS, 1998).

São disponíveis uma vasta gama de modelos para predição da evaporação em reservatório que se baseiam em informações meteorológicas, são eles: os propostos por PENMAN (1948), LINACRE (1993), KOHLER et al. (1955) e MORTON (1983a), entre outros (PEREIRA et al., 2009).

2.1.1 Modelo Penman

Howard Penman, em 1948, desenvolveu, na Inglaterra, o primeiro tratamento físico adequado com o intuito de estimar a evaporação de uma superfície de água livremente exposta à atmosfera, por meio de uma equação clássica, muito utilizada até os dias atuais (FONTES, 2005; OLIVEIRA, 2009).

De acordo com a compreensão física do processo, para que a evaporação ocorra é necessária uma força que promova o deslocamento das moléculas de água da superfície evaporante, e para a mudança de fase é necessária uma fonte de energia. A fonte de energia seria em função do saldo de radiação e a força para o deslocamento das moléculas é em função da diferença de pressão de vapor entre a superfície evaporante e o ar que a envolve, sendo responsáveis, respectivamente, por 75% e 25% do processo evaporativo (SOBRINHO, 1983).

Por envolver essas duas considerações teóricas, de transferência de massa e do balanço de energia radiante, a fórmula de Penman ficou enquadrada na categoria dos chamados métodos combinados (LEÃO et al., 2013).

A equação original de Penman fornece apenas a estimativa de evaporação da água livremente exposta. Em virtude disso, a evapotranspiração em uma superfície vegetada torna-se um pouco diferente. A variação nos resultados ocorre principalmente em função altura da vegetação, do clima e principalmente do efeito oásis na área. Abaixo, segue a equação do modelo:

$$E = \left(\frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \right) E_s + \left(\frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \right) E_a \quad (1)$$

em que,

E = evaporação em uma superfície de água livremente exposta, (mm d^{-1});

γ = coeficiente psicrométrico, ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$);

Δ = declividade da curva de pressão de saturação de vapor, ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$);

E_s = componente de evaporação devido ao ciclo do aquecimento, (mm d^{-1});

E_a = componente de evaporação devido ao vento (mm d^{-1}).

Os parâmetros necessários são os valores médios diários de temperatura do ar e da superfície da água, velocidade do vento, umidade relativa do ar e radiação solar, para prever a evaporação, integrando conjuntamente o efeito energético e aerodinâmico sobre esse fenômeno (PENMAN,1948). Normalmente, a dificuldade de disponibilidade de informações climáticas para o modelo, principalmente com relação aos dados de temperatura da água, tem se constituído em limitação à sua utilização. As medidas de radiação requerem equipamentos relativamente caros que precisam de manutenção regular e cuidadosas recalibrações. A partir de então, surgiu à motivação de muitos autores estudarem a simplificação do modelo ou introduzirem correções para diferentes localidades (OLIVEIRA, 2009). São exemplos de equações simplificadas: Kohler, Nordenson e Fox (1955), Kohler e Parmele (1967), Linacre (1977, 1993), Priestley e Taylor (1972), Stewart e Rouse (1976) e De Bruin (1978).

O método de Penman vem sendo utilizado em vários estudos pelo mundo apresentando resultados satisfatórios, como por exemplo, Vardavas e Fountoulakis (1996) que estimaram a evaporação média mensal em quatro lagos da Austrália em diferentes regiões climáticas, inclusive o semiárido.

Leitão et al. (2007), avaliando o desempenho dos métodos de Penman, Linacre, Snyder, Kohler et al., Gangopahyaya et al. e do balanço de energia (razão de Bowen) para duas regiões da Paraíba (Patos e Boqueirão), indicaram que os métodos de estimativa de evaporação que utilizam a umidade relativa do ar, velocidade do vento e a radiação solar,

apresentaram as melhores concordâncias com as medidas de evaporação no tanque de 20 m². Para a região de Patos, o método de Penman e Kohler et al. apresentaram os piores desempenhos com base nos indicadores estatísticos de Camargo e Sentelhas (1997).

Rosenberry et al. (2007) compararam 15 métodos de evaporação em um pequeno lago, em uma região de montanha, no nordeste dos Estados Unidos, adotando o método de balanço de energia-razão de Bowen (BERB) como o padrão. Os métodos de Priestley-Taylor, de Bruin-Keijman e de Penman foram os mais comparáveis com o BERB, com erros médios entre 0,19 e 0,27 mm dia⁻¹.

Rimmer et al. (2009) estimaram as taxas de evaporação para o lago Kinneret, Israel, utilizando a equação de Penman e observaram que os resultados da evaporação da água no lago profundo, quando a mudança de calor armazenado é desconsiderado, são muito semelhantes à evaporação medida no tanque Classe A.

Leão et al. (2013) utilizaram diferentes métodos combinados, derivados da equação de Penman, concluindo que todos os modelos foram adequados para a estimativa da evaporação no açude de Banabuiú – CE durante a estação seca, por terem apresentado ótimo desempenho em conformidade com os índices estatísticos.

Na China, Rong et al. (2013) estimaram a evaporação no lago Dongping a partir da equação de Penman, durante o período de 2003 a 2010, e verificaram o quanto os efeitos da variabilidade climática influenciavam na evaporação. Concluíram que a evaporação total anual no lago aumentou 18,24 mm no período de avaliação e os parâmetros climáticos que mais contribuíram para esse aumento foram o saldo de radiação e a temperatura do ar.

2.1.2 Modelo Linacre

Linacre (1977) desenvolveu uma fórmula empírica para a estimativa da evaporação em lagos a partir de uma simplificação do método de Penman. O modelo proposto se baseou no fato da equação de Penman utilizar

valores dos quatro parâmetros meteorológicos (saldo de radiação, umidade relativa, velocidade do vento, e temperatura do ar), que muitas vezes não estavam disponíveis.

Apesar do modelo exigir como parâmetros de entrada apenas os dados de temperatura média do ar e da coordenada geográfica local, Linacre (1977) acreditava que a equação calibrada teria muito da generalidade da fórmula básica de Penman, que se baseia na compreensão física do processo. A equação desenvolvida por Linacre (1977) é:

$$E_L = \frac{\frac{700 (T + 0,006 h)}{100 - \varphi} + 15(T - T_d)}{80 - T} \quad (2)$$

em que,

E_L = evaporação no lago, (mm por mês);

T = temperatura média do ar, ($^{\circ}\text{C}$);

h = altitude do local, (m);

φ = latitude local, (graus); e,

T_d = temperatura média mensal do ponto de orvalho, ($^{\circ}\text{C}$).

A equação 2 apresenta como principal desvantagem não levar em consideração o saldo de radiação e os termos aerodinâmicos e com isso tende a subestimar a evaporação. Portanto, Linacre (1993) propôs uma nova simplificação da equação de Penman, englobando dados de precipitação e velocidade do vento, e a testou em três lagos dos Estados Unidos, obtendo resultados satisfatórios com o novo modelo. A nova simplificação é dada pela expressão:

$$E_L = (0,015 + 0,00042T + 10^{-6}h) [0,8R_s - 40 + 2,5F u_2(T - T_d)] \quad (3)$$

em que,

E_L = evaporação no lago, (mm por mês);

R_s = radiação solar na superfície do lago, (W m^{-2});

F = fator de correção devido à altitude do local, adimensional;

u_2 = velocidade do vento a 2 m de altura, ($m s^{-1}$);

h = altitude do local, m;

T = temperatura do ar média mensal, ($^{\circ}C$); e,

T_d = temperatura do ponto de orvalho média mensal ($^{\circ}C$).

Para os climas brasileiros, Pereira et al. (2009) testaram alguns modelos e concluíram que o modelo Linacre (1993) tendia a superestimar da evaporação para o reservatório de Sobradinho – BA. Leitão et al. (2007) avaliaram o desempenho de diferentes métodos em duas regiões na Paraíba (Boqueirão e Patos) e constataram que o modelo Linacre (1993) e o método do balanço de energia tiveram melhor desempenho em Boqueirão. De acordo com os autores, o modelo Linacre (1993) apresentou erro sistemático, mas poderia ser ajustado à região para melhorar seu desempenho.

2.1.3 Modelo Kohler et al.

Uma nova adaptação para o modelo de Penman foi proposta por Kohler et al. (1955), tornando-a mais adequada para a estimativa da evaporação em lagos, sendo elaborada a partir de várias observações de campo.

No novo modelo, os autores procuraram compensar a igualdade existente entre a temperatura do ar e a temperatura real da superfície líquida existente na equação de Penman por meio de uma correção positiva para o coeficiente psicrométrico, além do saldo de radiação na superfície que passou a ser derivado como uma função da temperatura e radiação global (PEREIRA et al. 1997). A equação proposta foi:

$$E_L = \frac{(Q_{ir} - \varepsilon\sigma T_a^4) \Delta + E_a \left[\gamma + \frac{4\varepsilon\sigma T_a^3}{f(u)} \right]}{\Delta + \gamma + \frac{4\varepsilon\sigma T_a^3}{f(u)}} \quad (4)$$

em que,

Q_{ir} = diferença entre radiação solar incidente e refletida, (mm d^{-1});
 ε = constante de emissividade igual a 0,92;
 σ = constante de Stefan-Boltzmann igual a $4,903 \cdot 10^{-9} \text{ MJ K}^{-4}\text{m}^{-2} \text{ d}^{-1}$;
 T_a = temperatura média do ar, (K);
 Δ = declividade da curva de pressão de saturação de vapor, ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$);
 γ = coeficiente psicrométrico igual a $0,665 \cdot 10^{-3} \text{ (kPa } ^\circ\text{C}^{-1})$;
 $f(u)$ = coeficiente de transporte de vapor d'água; e,
 E_a = poder evaporante do ar, (mm d^{-1}).

O coeficiente de transporte de vapor d'água varia em função da velocidade do vento, sendo expresso pela equação:

$$f(u) = 1,361 + 0,01102 U \quad (5)$$

em que U é a velocidade do vento, (km d^{-1}).

O poder evaporante do ar segue a seguinte equação:

$$E_a = f(u) (e_s - e_a) \quad (6)$$

em que,

e_s = pressão parcial de vapor de saturação a 2 m de altura, (kPa); e,

e_a = pressão parcial de vapor a 2 m de altura, (kPa).

Leitão et al. (2007), avaliando o desempenho dos modelos de Penman, Linacre, Snyder, Gangopahyaya et al., Kohler et al. e do balanço de energia para duas regiões da Paraíba (Boqueirão e Patos), concluíram que o modelo de Kohler et al. mostrou um bom desempenho em Boqueirão, mas na região de Patos o desempenho não foi satisfatório com base nos indicadores estatísticos de Camargo e Sentelhas (1997).

Pereira et al. (2009) concluíram que os valores obtidos pelo modelo de Kohler et al. podem ser utilizados como referência para a predição da

evaporação média anual no reservatório de Sobradinho – BA por apresentar uma base conceitual mais fundamentada da equação original de Penman .

Leão et al. (2013), com o objetivo de avaliar diferentes métodos combinados na estimativa da evaporação no lago de Banabuiú – CE, verificaram que o modelo de Kohler et al. (1955) foi adequado para a estimativa da evaporação durante a estação seca.

2.1.4 Modelo Thornthwaite

Thornthwaite (1948) desenvolveu um método empírico para a estimativa da evapotranspiração, que se baseia na relação entre a temperatura média mensal e a evapotranspiração potencial para um mês de 30 dias com 12 horas de insolação. As equações propostas foram baseadas no balanço hídrico de bacias hidrográficas e medidas de evapotranspiração realizadas em lisímetros (PEREIRA et al., 1997). A principal vantagem do modelo, apontada em algumas literaturas, é a utilização apenas dos dados de temperatura média como parâmetro de entrada, principalmente em regiões em que outros parâmetros meteorológicos não estão disponíveis.

A equação desenvolvida por Thornthwaite (1948) é expressa da seguinte forma:

$$ETP_p = 16 \left(\frac{10 T}{I} \right)^{6,75 \times 10^{-7} I^3 - 7,71 \times 10^{-5} I^2 + 1,7912 \times 10^{-2} I + 0,49239} \quad (7)$$

em que,

ETP_p = evapotranspiração potencial mensal, (mm por mês);

T = temperatura média mensal, $T > 0$ °C, (C°); e,

I = índice de calor da região.

Thornthwaite (1948) afirma que o modelo está longe de ser satisfatório, já que relações entre evaporação e clima em lugares específicos não se aplicam necessariamente em outro lugar. Assim, por ser uma equação desenvolvida para condições de clima úmido, apresenta subestimativa da

evapotranspiração em climas secos, mas, apesar desse fator limitante, é bastante empregado na escala mensal nos estudos climatológicos. Pereira et al. (1997) destacam que outros métodos também utilizam apenas a temperatura como condicionante da evapotranspiração, sendo portanto, criticado injustamente pela sua limitação.

Rosenberry et al. (2007), no nordeste dos Estados Unidos da América (EUA), utilizaram o método de Thornthwaite para estimar a evaporação em um pequeno lago na região montanhosa, de clima úmido e continental, conjuntamente com outros 14 métodos: cinco métodos combinados; três métodos que se baseiam na medição da radiação solar e temperatura do ar; dois métodos que requerem temperatura do ar e da superfície da água, umidade relativa do ar e velocidade do vento; dois que exigem temperatura do ar e duração do dia; dois que requerem apenas temperatura do ar; e comparou-os com o método do balanço de energia pela razão de Bowen (BREB). Os autores comprovaram que os métodos que requerem radiação solar e temperatura do ar em sua formulação não são expressivamente melhores que aqueles que exigem apenas informações da temperatura do ar. O trabalho aponta que os métodos mais simples, como Thornthwaite e Papadakis, fornecem estimativas precisas em relação a vários métodos mais complexos.

2.1.5 Modelo CRLE

A partir do conceito de relação complementar, inicialmente desenvolvido por Bouchet (1963), no qual as variações na evapotranspiração potencial e regional são complementares, Morton desenvolveu várias pesquisas por considerar essa uma hipótese de trabalho plausível. O modelo proposto por Morton (1983a, 1983b) para a estimativa da evapotranspiração real ou regional de uma grande área, denominado Complementary Relationship Areal Evapotranspiration (CRAE), e para a evaporação no lago, denominado Complementary Relationship Lake Evaporation (CRLE), foi fundamentado com base na seguinte equação:

$$E_{TR} + E_{TP} = 2E_{TW} \quad (8)$$

em que,

E_{TR} = evapotranspiração real ou regional, (mm por mês);

E_{TP} = evapotranspiração potencial, (mm por mês); e,

E_{TW} = evapotranspiração de equilíbrio, (mm por mês).

A evapotranspiração real ou regional é a de uma área grande o bastante de forma que os efeitos dessa evapotranspiração dominem o campo da temperatura e da umidade do ar, de tal forma que os efeitos da camada de transporte que entram na vizinhança (efeito oásis) sejam irrelevantes.

Estimada através da solução das equações de balanço de energia e transferência de vapor, a evapotranspiração potencial representa aquela que ocorreria em uma superfície úmida hipotética com características de absorção de radiação, transferência de calor e transferência de vapor semelhante às daquelas da área, e pequena o bastante de tal forma que os efeitos da evapotranspiração sobre a camada de ar soprante sejam desprezíveis.

A evapotranspiração de equilíbrio, ou de ambiente úmido, representa a que deveria ocorrer se a superfície solo planta da área estivesse saturada e não houvesse limitações de disponibilidade de água para o processo.

A equação (6) indica que a evapotranspiração é em função da disponibilidade de água no solo e que existe relação complementar entre a evapotranspiração potencial e a regional de uma grande área, e o modelo CRAE baseia-se nesse conceito. A representação esquemática do modelo CRAE é apresentada na Figura 1.

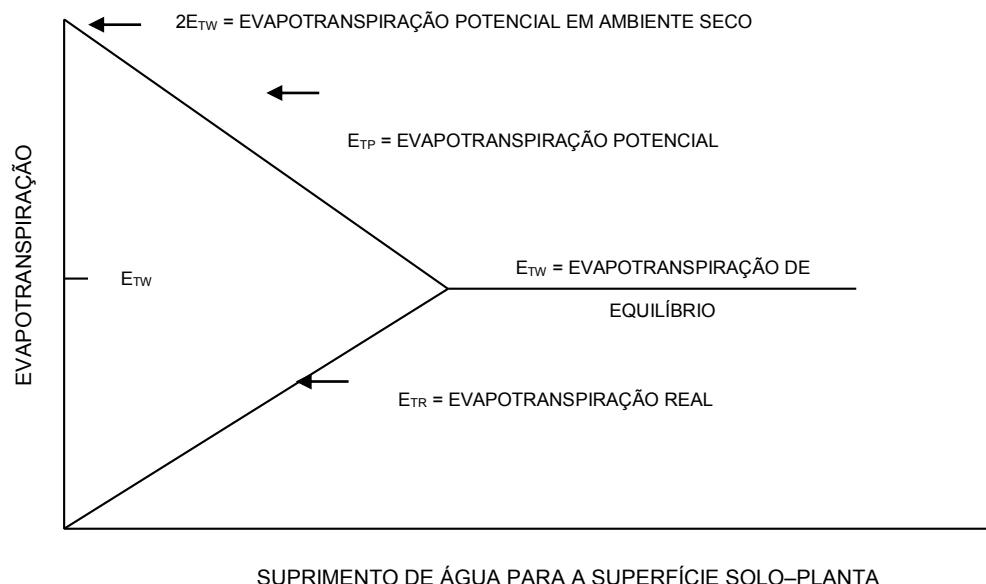


Figura 1 - Representação esquemática da relação complementar entre a evapotranspiração real (ETR) e a potencial (ETP), para um constante suprimento de energia radiante.

Fonte: MORTON, 1983b, p. 80.

De acordo com a Figura 1 e sob a condição de constante suprimento de energia radiante, a evapotranspiração regional (E_{TR}) é nula, quando não há disponibilidade de água. A evapotranspiração potencial (E_{TP}) terá sua taxa máxima, pois o solo estará seco e a atmosfera quente e seca. Em tais condições, a evapotranspiração potencial corresponde a duas vezes a evapotranspiração de equilíbrio (E_{TW}). A medida que ocorre um aumento no abastecimento de água na região para a superfície solo-planta, há um crescimento da evapotranspiração real, tornando a camada de ar mais fria e úmida, que por sua vez promove uma diminuição na evapotranspiração potencial. Finalmente, os valores de evapotranspiração real e potencial convergem para a evapotranspiração de equilíbrio, quando a superfície solo-planta estiver aumentado suficientemente a disponibilidade de água (MORTON, 1983b; PEREIRA, 2004). Dessa forma, Morton (1983b) afirma que a evapotranspiração potencial em condições úmidas corresponde a metade da que ocorre em condições totalmente áridas.

A relação entre a evaporação no lago e a evaporação potencial no ambiente terrestre (modelo CRLE) é representada esquematicamente pela Figura 2, em condições de constante suprimento de energia radiante. Esta

complementariedade considera que a evaporação potencial em um ambiente terrestre completamente seco, corresponderia ao dobro da evaporação no lago, e que decresceria à medida que o suprimento de água no solo aumentasse até um valor mínimo igual a evaporação do lago (MORTON, 1983b).

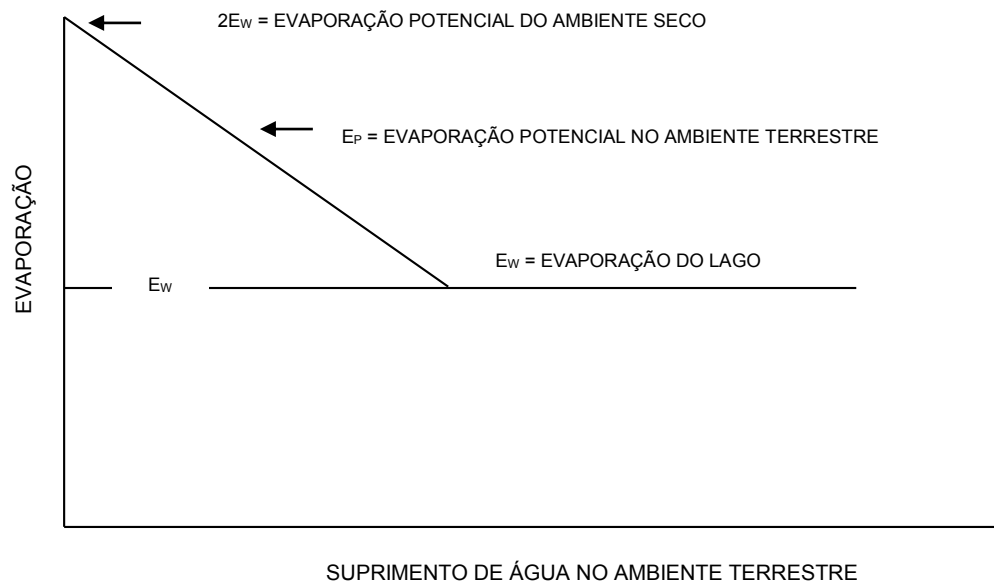


Figura 2 - Representação esquemática da relação entre as evaporações do lago (E_w) e potencial (E_p) no ambiente de terrestre com constante fornecimento de energia radiante.

Fonte: MORTON, 1983b, p. 81.

Quando não há água disponível para a evapotranspiração no ambiente terrestre adjacente, a evapotranspiração real é nula, concomitantemente o ar estará quente e seco, assim a evaporação potencial atinge seu valor máximo igual a $2E_w$. A medida que aumenta a disponibilidade de água para a vegetação, resulta em um aumento equivalente na evapotranspiração real, que leva ao umedecimento e resfriamento do ar na região promovendo um decréscimo na evaporação potencial. Quando houver um significativo aumento na quantidade de água, a evaporação potencial converge para a evaporação no lago (MORTON, 1983b; TOSTES, 1993; ROQUE; SANSIGOLO, 2001; FONTES, 2005).

Morton desenvolveu os dois modelos porque existem diferenças entre os processos. A absorção da radiação e a transferência de vapor característico

da água não são iguais às aquelas que ocorrem na superfície do solo onde há vegetação. Desse modo, a evaporação em um lago e a evaporação potencial diferem, respectivamente, da evapotranspiração regional de ambiente úmido e da evapotranspiração potencial (PEREIRA, 2004).

A principal vantagem dos modelos da relação complementar é que eles permitem que a evapotranspiração real ou evaporação no lago, possam ser estimados por meio dos parâmetros meteorológicos rotineiramente observados, já que a relação contorna a complexidade do sistema solo-planta por se basear na interação entre a superfície evaporante e o ar circulando no ambiente, mas para isso o lago deve ser suficientemente largo e os efeitos da borda desprezados. Dessa forma, a metodologia pode ser mundialmente aplicada sem necessitar de coeficientes otimizados localmente (MORTON, 1983b; ROQUE; SANSIGOLO, 2001; ARANTES; TROVATI, 2002; TROVATI, 1987 citado por PEREIRA, 2004). De acordo com Arantes e Trovati (2002), trabalhos utilizando os modelos são incentivados com o propósito de validar seu uso em diversos ambientes e melhorar sua precisão.

Em conformidade com Fontes (2005), a relação inversa existente nos modelos é evidenciada em vários trabalhos, como de Davenport e Hudson (1967) e Salomon (1967). Em sua publicação, Morton (1983b), cita a pesquisa de Davenport e Hudson (1967) no qual são apresentados resultados de evaporação obtidos por evaporímetros em três áreas cultivadas com algodão (FIGURA 3).

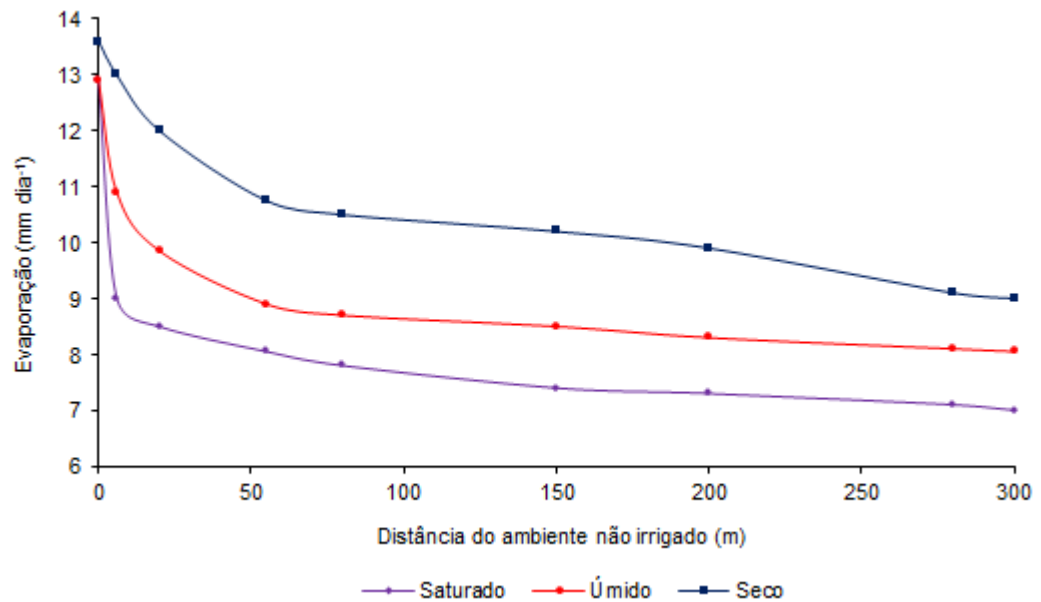


Figura 3 - Evaporação obtida por evaporímetros em três campos cultivados com algodão.

Fonte: Davenport e Hudson, 1967, p. 348.

A Figura 3 representa o que os autores verificaram com o experimento. Quando há passagem de ar do deserto, ou de uma área de sequeiro, sobre um campo de algodão irrigado, a evaporação medida nos evaporímetros diminuía rapidamente na direção do vento e se aproximava de um valor constante a uma distância de 300m. Isso ocorria porque a partir da área de bordadura (40 a 50 m), a massa de ar reduzia a sua capacidade evaporativa pela diminuição da temperatura e aumento da umidade. De acordo com Morton (1983b), a evaporação nos evaporímetros, das áreas irrigadas e de sequeiro, fornece uma analogia com o que acontece sobre os lagos em climas úmidos, onde os contrastes entre ambientes lacustres e terrestres são menos extremos.

Por mais que o modelo esteja fundamentado em uma base física realista, Morton (1983b) ressalta algumas limitações da metodologia quanto ao seu uso, que são:

- os dados de temperatura e umidade relativa do ar devem ser precisos e representativos da área de interesse;
- devido a variação no armazenamento subsuperficial de energia, o método não pode ser utilizado para curtos períodos de tempo;

- por causa da advecção de calor e vapor de água da subcamada da atmosfera, não deve ser utilizado em ambientes frios descontínuos, como em latitudes altas e nas extremidades de oásis;
- por não englobar conhecimento do solo e da vegetação, não pode ser utilizado para diagnosticar mudanças naturais ou antrópicas;
- desconsidera os efeitos da velocidade do vento na evaporação em lagos. Isso, porque os efeitos da evaporação pelo aumento da velocidade do vento são compensados pela diminuição da temperatura na superfície da água, e as medições da velocidade do vento em terra são muito sensíveis ao peso do aparelho, o que não fornece uma boa estimativa do parâmetro para o ambiente lacustre.

Com base nos conceitos fundamentados, Morton propôs a equação para a estimativa da evaporação no lago que relaciona transferência de massa e balanço de energia com temperatura de equilíbrio, substituindo a temperatura real da água através de uma modificação da equação de Priestley e Taylor. A adaptação inclui os efeitos das variações de temperatura na superfície nos balanços de ondas longas e nas taxas de variação das pressões de saturação do vapor d'água com a temperatura (FONTES, 2005).

Reis e Dias (1998) realizaram um estudo de evaporação, em um pequeno reservatório de abastecimento em Minas Gerais durante 30 meses, e concluíram que o modelo CRLE tende a superestimar a evaporação ligeiramente, em 8%, durante o período. No entanto, sua temperatura de equilíbrio é tendenciosa em relação à temperatura da superfície da água, e as estimativas das taxas de variação de entalpia precisam ser melhoradas.

Vallet-Coulomb et al. (2001) estimaram a evaporação para o Lago Ziway, Etiópia (África tropical) e encontraram taxas de evaporação anual, pelo modelo CRLE, na ordem de 1.730 mm por ano, a partir de valores médios mensais de temperatura do ar, umidade e insolação.

Roque e Sansigolo (2001) utilizaram o modelo de relação complementar (CRLE), para o período de 1976 -1997 para o lago de Taquaruçu – SP,

região caracterizada por um clima tropical, e concluíram que o modelo superestimou a evaporação em relação ao tanque Classe A.

Fontes (2005) estimou a evaporação em reservatórios localizados no semiárido por meio da aplicação de métodos consolidados, e concluiu que os resultados obtidos com o modelo CRLE foram os mais consistentes por ele levar em consideração o conceito de temperatura de equilíbrio.

Pereira et al. (2009) estimaram a evaporação líquida no reservatório de Sobradinho – BA pelo modelo de relação complementar – CRLE juntamente com outros métodos, e concluíram que além da maior complexidade do modelo, foi o que apresentou resultados mais discrepantes em virtude da falta de sensibilidade a velocidade do vento, subestimando a evaporação.

2.1.6 Método do Tanque Classe A

A medição direta da evaporação em lagos exige a utilização de tanques evaporimétricos onde o nível da água possa ser lido com precisão. Tais instrumentos estão sujeitos aos efeitos diretos da radiação, temperatura, velocidade do vento e umidade, e em virtude a facilidade do método e da correlação positiva entre a evaporação da água do tanque com a do lago, estes têm sido frequentemente utilizados (PEREIRA et al., 1997).

Várias pesquisas têm sido realizadas com a finalidade de associar a evaporação de lagos com a de tanques. Para isso, utiliza-se o coeficiente de tanque como uma simples aproximação entre a evaporação do lago e a evaporação do tanque (OLIVEIRA, 2009).

Existem vários tipos de tanques de evaporação, que se diferem quanto ao material de construção, dimensões e ao tipo de instalação. Os mais comumente utilizados são: Classe A, desenvolvido pelo Serviço Meteorológico Norte Americano (USWB) instalado à superfície; o GGI-3000, desenvolvido pela antiga União Soviética; e o Tanque de 20 m². Os dois últimos modelos são de paredes enterradas (PEREIRA et al., 1997).

De acordo com Oliveira (2009), em 1965 a World Meteorological Organization (WMO), recomendou o tanque de 20 m² como padrão para ser utilizado como referência em estudos comparativos com evaporímetros, a

fim de fornecer as bases necessárias para a escolha do instrumento universalmente aceito. Mas, o evaporímetro de uso mais generalizado para estimar a evaporação em lagos, inclusive no Brasil, é o tanque Classe A. Segundo Gangopadhyaya et al. (1966) sua utilização consiste na multiplicação da evaporação medida no tanque com o coeficiente de tanque. Porém, Volpe e Oliveira (2003) salientam o cuidado que se deve ter na escolha do coeficiente, uma vez que o mesmo deve ser apropriado para determinadas condições de climáticas, tendo em vista que a capacidade de armazenar energia dos tanques é menor que a dos lagos.

Têm sido realizados vários estudos para a determinação do coeficiente de tanque, referenciado na literatura por k_p . Em conformidade com ONS (2004), o fator que relaciona a evaporação oscila entre 0,6 e 0,8 sendo 0,7 o valor mais utilizado. O coeficiente 0,7 é recomendado quando as temperaturas do ar e da água são iguais, já o coeficiente 0,6 é aplicado em climas quentes e áridos, quando a temperatura média da água é menor que a do ar. O coeficiente 0,8 deve ser utilizado em regiões úmidas, quando a temperatura da água no tanque é maior que a do ar (GANGOPADHYANA et al., 1966). Apesar das recomendações, autores mostram que o uso habitual do coeficiente 0,7 para converter evaporação do tanque Classe A para evaporação de lago pode conduzir a erros significativos, a não ser que os efeitos da energia de advecção no lago e a transferência de calor através do tanque sejam levados em consideração (OLIVEIRA et al., 2005).

Os valores do coeficiente do tanque, para algumas localidades dos Estados Unidos, são apresentados por Roque e Sansigolo (2001): 0,81 no lago Okeechobee (Flórida), onde a precipitação média anual é de aproximadamente 1.400 mm; 0,70 no lago Heffner (Oklahoma), onde a precipitação média anual é de aproximadamente 800 mm; e 0,52 no lago Salton (Califórnia), onde a precipitação média anual é de aproximadamente 60 mm. Os resultados desse estudo mostram a compatibilidade existente com a relação complementar, indicando que os lagos criam condições ambientais próprias que diferem do ambiente terrestre, principalmente quando o clima é árido.

Para o lago de Taquaruçu, localizado no rio Paranapanema, região sudoeste de São Paulo, Roque e Sansigolo (2001) estimaram a evaporação

pelo método do Tanque Classe A e chegaram a um coeficiente de tanque de 0,86.

Pereira et al. (2009) encontraram o coeficiente de tanque de 0,57 para representar a variação sazonal da evaporação do reservatório de Sobradinho – BA.

Analisando a evaporação e o uso do coeficiente k_p em Patos, microrregião mais quente, e Boqueirão, microrregião um pouco menos quente, Oliveira et al. (2005) observaram que o valor 0,70, usualmente utilizado para corrigir a evaporação obtida no Tanque Classe A não representava estimativas corretas da evaporação em nenhuma das regiões. De acordo com os autores, o coeficiente 0,70 ao invés de corrigir, contribui para a subestimativa da evaporação obtida no tanque Classe A, sendo maiores no período frio e úmido.

Lowe et al. (2009), quantificando as incertezas da utilização do coeficiente de tanque na evaporação de reservatórios, concluíram que o tanque deve ser localizado no reservatório de forma que os erros possam ser minimizados.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da área de estudo

O rio São Francisco nasce na serra da Canastra em Minas Gerais e sua bacia, com área de drenagem de 639.219 km² (ANEEL, 1998), está compreendida entre as latitudes 7°00' e 21°00' S e as longitudes 35°00' e 47°40' W, estendendo-se pelos estados de Minas Gerais, Bahia, Goiás, Pernambuco, Sergipe e Alagoas, além do Distrito Federal.

As principais usinas hidrelétricas já instaladas são Três Marias, Sobradinho, Itaparica, Moxotó, Paulo Afonso e Xingó (PEREIRA, 2004).

Fazendo parte da região do Submédio São Francisco, o reservatório de Sobradinho (Figura 4) está localizado no município de Sobradinho – BA, cujas coordenadas geográficas são 09°35'00" W e 40°50'00" S. Situado a cerca de 40 km a montante das cidades de Juazeiro - BA e Petrolina – PE possui, além da função de geração de energia elétrica, a de principal fonte de regularização dos recursos hídricos da região (MORORÓ, 2005).

Com capacidade de armazenamento de 34,1 bilhões de metros cúbicos, o reservatório forma um dos maiores lagos artificiais do mundo, com espelho d'água de 4.214 km², e vazão regularizada de 2.060 m³ s⁻¹ que permite a operação de todas as outras usinas ao longo do rio São Francisco (CHESF, 2014).

Supervisionada pela Companhia Hidrelétrica do São Francisco (CHESF), Sobradinho foi construída em 1973 e iniciou sua operação em 1979. Possui comprimento total de 12,4 km, altura máxima de 41 m e potência instalada de 1.050.300 kW (CHESF, 2014).

O reservatório faz parte de uma região caracterizada por um clima, predominantemente, semiárido e árido. De acordo com a classificação de Köppen a região se enquadra no clima do tipo BSh, com altas temperaturas e precipitação menos abundante. O índice pluviométrico varia de 300 a 800 mm, temperatura média anual em torno de 27°C e insolação total anual por volta de 2.800 h (DOMINGUES, 2006).

A usina hidrelétrica de Três Marias (Figura 4), localizada no Alto São Francisco, no município de Três Marias – MG, está compreendida na latitude

18°13'33" S e longitude 45°14'56" W (MORORÓ, 2005). Sob a coordenação da Companhia Energética do Estado de Minas Gerais (CEMIG) foi construída em 1957 e teve como principais objetivos a regularização do rio São Francisco, melhoria nas condições de navegabilidade e potencial hidrelétrico. Em operação desde 1962, a barragem possui comprimento de 2,7 km, altura máxima de 75 m, volume de 19,528 bilhões de metros cúbicos e potência instalada de 396.000 kW, além de possuir vazão regularizada de 513 m³ s⁻¹ e espelho d'água de 1.040 km² (CEMIG, 2014).

O reservatório, que se localiza na região fisiográfica do Alto São Francisco possui como clima predominante o tropical úmido. De acordo com a classificação de Köppen a região se enquadra no clima do tipo Aw, ou seja, quente e úmido, com estação seca no inverno e chuvas no verão. O índice pluviométrico varia de 1.000 a 2.000 mm, temperatura média anual em torno de 23°C, insolação total anual por volta de 2.400 h e no verão a umidade relativa do ar fica acima de 80% (DOMINGUES, 2006).

3.2 Aquisição de dados meteorológicos

Os dados meteorológicos, utilizados neste trabalho, foram obtidos na CHESF (Companhia Hidrelétrica do São Francisco), CEMIG (Companhia Energética do Estado de Minas Gerais) e INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). As estações meteorológicas são apresentadas na Tabela 1, assim como sua localização geográfica e respectivas operadoras.

Tabela 1 - Estações meteorológicas utilizadas

Estação	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Operador
Sobradinho	-09°25'59"	-40°49'40"	371	CHESF
Petrolina	-09°22'48"	-40°28'48"	370	INMET
Remanso	-09°37'48"	-42°06'00"	400	INMET
Três Marias	-18°12'54"	-45°15'33"	597	CEMIG
Três Marias – A528	-18°12'00"	-45°28'00"	931	INMET
Curvelo	-18°45'00"	-44°27'00"	672	INMET
Pompéu	-19°12'36"	-45°00'00"	691	INMET

Na Figura 5 encontram-se a localização espacial das estações meteorológicas utilizadas no trabalho.

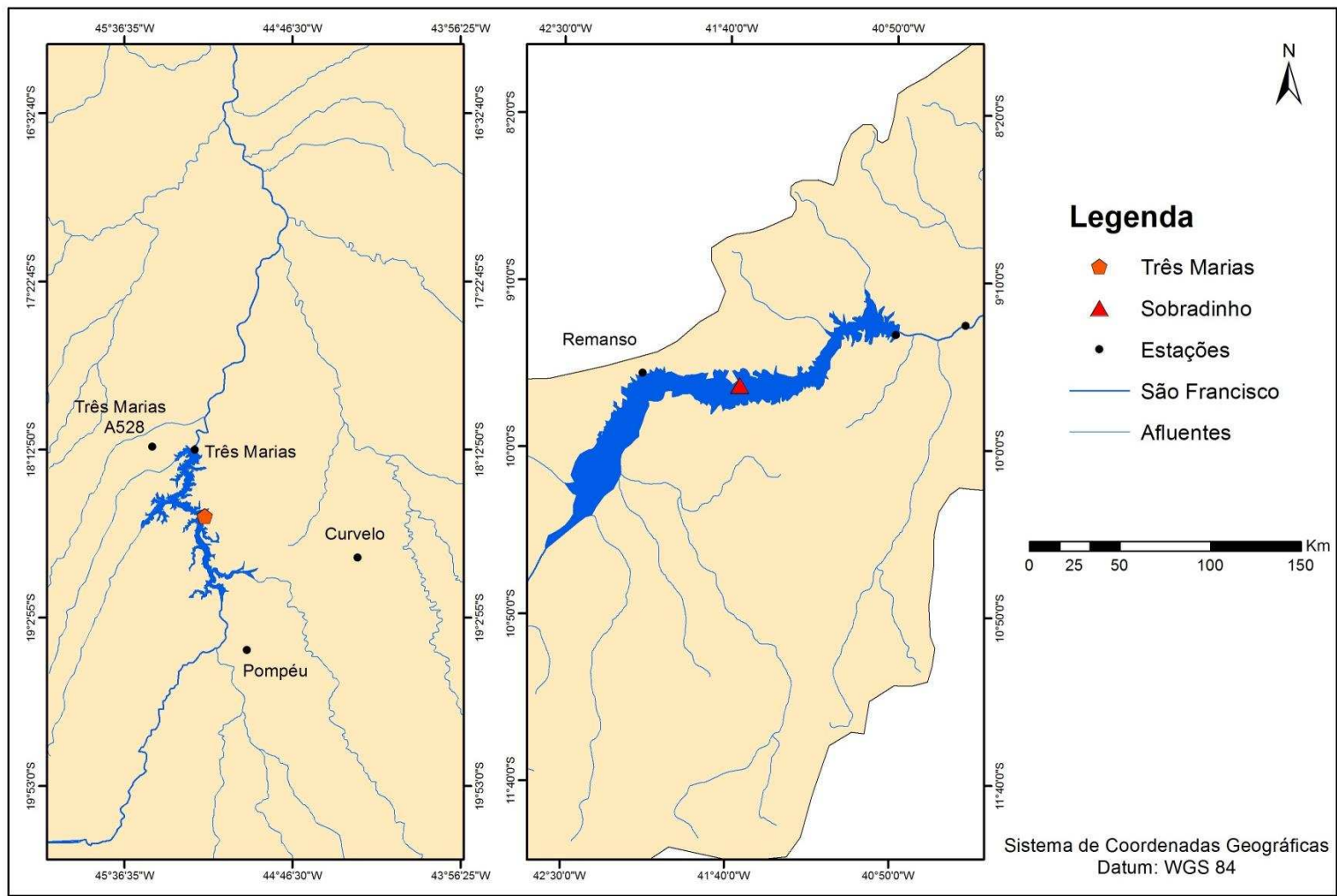


Figura 5 - Localização geográfica das Estações no reservatório de Sobradinho e Três Marias e no entorno das barragens.

Em cada estação foram obtidas as médias mensais de temperatura máxima e mínima, umidade relativa do ar, velocidade do vento, precipitação pluvial e insolação. Apenas as estações Três Marias e Três Marias – A528 forneceram dados de radiação solar. Os valores de evaporação no tanque Classe A foram obtidos apenas para a estação de Sobradinho, devido a falta de tais informações nos demais postos de coleta. Das estações selecionadas, a de Sobradinho e Três Marias (monitorada pela CEMIG), encontram-se instaladas nas áreas das barragens, as outras estão situadas no entorno dos reservatórios.

A partir da data de operação de cada um dos reservatórios, foram escolhidos apenas os anos que apresentavam dados completos, sem falhas nos registros das séries. Na Tabela 2 estão listados os períodos selecionados para cada estação.

Tabela 2 - Período de dados considerados na análise

Estação	Período
Sobradinho	1980, 1984, 1986-1991, 1994, 1996-1998, 2003-2012
Petrolina	1983, 1996-1998, 2002-2007, 2009-2013
Remanso	1979, 1980, 2001, 2002, 2006-2008, 2010, 2012
Três Marias	2000, 2001, 2002
Três Marias – A528	2007-2013
Curvelo	1981, 1982, 1986-1990, 1994, 1999
Pompéu	1975-1978, 1986, 1989-1993, 1995-2004

3.3 Estimativa da evaporação no reservatório

A estimativa da evaporação nos reservatórios de Sobradinho e Três Marias foram realizadas com base nos dados meteorológicos citados no item 3.2. O cálculo foi realizado com base nas seguintes metodologias: modelo de Penman (1948), modelo Linacre (1993); modelo de Kohler et al. (1995);

modelo de Thornthwaite (1948); modelo conceitual de relação complementar (CRLE), proposto por MORTON (1983b) e tanque Classe A (ECA).

Foram obtidos dois resultados de evaporação para cada reservatório: um estimado com os dados fornecidos pelas estações localizadas na área do reservatório, e o outro calculado usando dados das estações alocadas nas cidades ao entorno, para verificar se as mesmas podem ser utilizadas quando não houver instalado no reservatório uma estação meteorológica.

3.3.1 Modelo Penman

A evaporação no reservatório (mm por mês), de acordo com o modelo proposto por Penman, foi calculada de acordo com a equação:

$$E_L = 86,4 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} - \frac{R_n - G}{\lambda \rho} + \frac{\gamma}{\Delta + \lambda} 0,26(0,5 + 0,54u_2)(e_s - e_a) \quad (9)$$

em que,

Δ = declividade da curva de pressão de saturação de vapor, (kPa °C⁻¹);

γ = coeficiente psicrométrico, (kPa °C⁻¹);

R_n = saldo radiação, (W m⁻²);

λ = calor latente de vaporização, (MJ kg⁻¹);

ρ = densidade da água, (1000 kg m⁻³);

u_2 = velocidade do vento tomada 2 m acima da superfície, (m s⁻¹);

e_s = pressão de saturação de vapor à temperatura do ar, (mb); e,

e_a = pressão parcial de vapor, (mb).

A obtenção dos parâmetros da equação 9 seguiu a metodologia descrita por Allen et al. (1998). O calor latente de vaporização (λ), em MJ kg⁻¹, foi calculado com base na seguinte equação:

$$\lambda = 2,501 - 0,002361 T \quad (10)$$

em que,

T = temperatura média do ar mensal, (°C).

Para o cálculo da saldo de radiação (R_n), em $W m^{-2}$, utilizou-se a equação:

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (11)$$

em que,

R_{ns} = saldo de radiação de ondas curtas, ($W m^{-2}$), e;

R_{nl} = saldo de radiação de ondas longas, ($W m^{-2}$).

O saldo de ondas curtas foi calculado com base na seguinte equação:

$$R_{ns} = (1-\alpha) R_s \quad (12)$$

em que,

α = albedo;

R_s = radiação solar global, ($W m^{-2}$).

Para o cálculo da radiação solar foi utilizado a equação:

$$R_s = (a_s + b_s \frac{n}{N}) R_a \frac{1}{0,0864} \quad (13)$$

em que,

$a_s + b_s$ = fração da radiação extraterrestre que chega a terra em dias claros, os valores adotados foram $a_s=0,25$ e $b_s = 0,50$, recomendados por Allen (1998);

R_a = radiação extraterrestre, ($MJ m^{-2} d^{-1}$);

n = insolação, (h);

N = duração máxima diária de brilho solar, (h).

O cálculo do saldo de radiação de ondas longas (R_{nl}) procedeu-se com base na equação:

$$R_{nl} = \sigma \left[\frac{T_{kx}^4 + T_{kn}^4}{2} \right] (0,34 - 0,14\sqrt{e_a}) \left(1,35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35 \right) \frac{1}{0,0864} \quad (14)$$

em que,

σ = constante Stefan-Boltzmann, $4,903 \cdot 10^{-9} \text{ MJ K}^{-4} \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$;

R_{so} = radiação solar para dias sem nuvens, ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$);

T_{kx} = temperatura máxima, (K);

T_{kn} = temperatura mínima, (K).

A radiação solar para dias sem nuvens (R_{so}), em $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, foi calculada de acordo com a equação:

$$R_s = (0,75 \text{ h}) R_a \quad (15)$$

3.3.2 Modelo Linacre

A evaporação em reservatórios foi calculada de acordo da equação 16, proposta por Linacre (1993), quando são conhecidos os dados de temperatura média, precipitação, e velocidade do vento.

$$E_L = (0,015 + 0,00042T + 10^{-6}h) [0,8R_s - 40 + 2,5F u_2(T - T_d)] \quad (16)$$

em que,

E_L = evaporação no lago, (mm por mês);

R_s = radiação solar na superfície do lago, (W m^{-2});

F = fator de correção devido à altitude do local, adimensional;

u_2 = velocidade do vento a 2 m de altura, (m s^{-1});

h = altitude do local, (m);

T = temperatura média do ar mensal, ($^{\circ}\text{C}$); e,

T_d = temperatura média mensal do ponto de orvalho ($^{\circ}\text{C}$).

O valor de R_s foi calculado com base em dados de precipitação. O cálculo desse fator leva em consideração a interferência que as nuvens

provocam na transmitância da radiação solar extraterrestre, atenuando essa radiação, e assim interferindo na radiação solar que atinge a superfície. Dessa forma, R_s foi calculado a partir da equação:

$$R_s = R_a - (0,85 - 0,047C_m) \quad (17)$$

em que,

R_a = radiação extraterrestre, ($W m^{-2}$); e,

C_m = média do número de décimos do céu ocupado pela nuvem no momento da observação.

Com os dados de precipitação total mensal (P_m), em mm, o valor de C_m foi calculado utilizando a equação:

$$C_m = 1 + 0,51 \log (P_m) + [\log (P_m)]^2 \quad (18)$$

O fator de correção devido a altitude (h) do local é dado pela seguinte equação:

$$F = 1,0 - 0,000087 h \quad (19)$$

3.3.3 Modelo Kohler et al.

A evaporação no reservatório (mm por mês), de acordo com o modelo proposto por Kohler et al., foi estimada a partir da equação:

$$E_L = 0,7 \left(\frac{\Delta R_n}{\Delta + \gamma_L} + \frac{\gamma_L E_a}{\Delta + \gamma_L} \right) \quad (20)$$

em que,

γ_L = coeficiente psicrométrico corrigido, ($kPa \text{ } ^\circ C^{-1}$);

Δ = declividade da curva de pressão de saturação de vapor, ($kPa \text{ } ^\circ C^{-1}$);

E_a = poder evaporante do ar, ($mm d^{-1}$); e,

R_n = saldo de radiação, em equivalente de lâmina de água evaporada, (mm d^{-1}).

O coeficiente psicrométrico foi calculado a partir da seguinte equação:

$$\gamma_L = 0,000661 P \quad (21)$$

em que,

P = pressão atmosférica, (kPa).

O poder evaporante do ar foi estimado em função da velocidade do vento e do déficit de pressão de saturação de vapor, por meio da equação:

$$E_a = 7,518(0,37+0,00255 U)(e_s - e_a)^{0,88} \quad (22)$$

O saldo de radiação, representado pela expressão ΔR_n , foi obtido pela equação:

$$\Delta R_n = 154,4 \exp \left[(1,8T - 180) (0,1024 - 0,0106 \ln(0,239R_s)) - 0,01554 \right] \quad (23)$$

3.3.4 Modelo Thornthwaite

A estimativa de evaporação no reservatório (mm por mês) pelo modelo de Thornthwaite (1948) foi feita com base na seguinte equação:

$$E_L = \left(1,6 \left(\frac{10 T_a}{I} \right)^{6,75 \times 10^{-7} I^3 - 7,71 \times 10^{-5} I^2 + 1,79 \times 10^{-2} I + 0,49} \right) \left(\frac{10}{d} \right) \quad (24)$$

em que,

T_a = temperatura média do ar mensal, (C°);

I = índice de calor anual; e,
d = número de dias do mês.

O índice de calor anual foi calculado pela equação:

$$I = \sum_{n=1}^{12} i, i = \left(\frac{T_a}{5} \right)^{1,514} \quad (25)$$

em que i corresponde ao mês do ano (i =1, janeiro; ...; i =12, dezembro).

3.3.5 Modelo CRLE

A estimativa da evaporação no reservatório foi realizada utilizando a equação 26, desenvolvida por Morton (1983a) a partir de modificação da equação de Priestley e Taylor:

$$E_w = 13 + 1,12 \left(1 + \frac{0,66 \frac{P}{P_s}}{\Delta_p} \right)^{-1} R_{TP} \quad (26)$$

em que,

E_w = evaporação no lago, (mm por mês);

P = pressão atmosférica na localidade considerada, (mb);

P_s = pressão atmosférica ao nível do mar, (mb);

Δ_p = declividade da curva de pressão de saturação de vapor na temperatura de equilíbrio, ($\text{mb}^\circ\text{C}^{-1}$); e,

R_{TP} = saldo de radiação na temperatura de equilíbrio, (W m^{-2}).

Morton (1983a), por meio de calibrações realizadas em diversas regiões áridas do mundo, obteve os valores das constantes empíricas “13” e “1,12”, apresentadas na equação 26.

A relação entre a pressão atmosférica na localidade considerada e ao nível do mar foi obtida pela equação:

$$\frac{P}{P_s} = \left[\frac{288 - 0,0065h}{288} \right]^{5,256} \quad (27)$$

em que h é a altitude do local, (m).

Calculou-se, pela equação 28, a declividade da curva de pressão de saturação de vapor:

$$\Delta_p = 4098,17 \frac{v}{(T+237,3)^2} \quad (28)$$

em que v é a pressão de saturação de vapor na temperatura média do ar, (mb).

Com base na equação de Tetens, foi estimada a pressão de vapor de saturação de vapor, expressa por:

$$v = 6,11 \exp \left[\frac{17,27 T}{T+237,3} \right] \quad (29)$$

O saldo de radiação na temperatura de equilíbrio foi obtido pela seguinte expressão:

$$R_{TP} = 0,66 \frac{P}{P_s} f_w (T_P - T) + E_P \quad (30)$$

em que,

E_P = evaporação potencial, (mm por mês);

f_w = coeficiente de transferência de vapor, adimensional; e,

T_P = temperatura de equilíbrio da subcamada de ar próximo à superfície, (°C).

O coeficiente de transferência de vapor, considerado independente da velocidade do vento por Morton (1983a), foi obtido pela equação:

$$f_w = \frac{\left(\frac{P_s}{P}\right)^{0,5} f_z}{\zeta} \quad (31)$$

em que,

ζ = fator de estabilidade; e,

f_z = constante para cálculo da evaporação em lagos e igual a 25,0 W m⁻² mb⁻¹.

Considerando o fato de que as condições do fluxo de radiação e as condições de transferência de vapor na equação de Penman (1948) sugerem um índice representativo do efeito da estabilidade atmosférica e da transferência de vapor, o fator de estabilidade foi calculado pela equação:

$$\zeta = \left\{ \frac{0,28 \left(1 + \frac{u_D}{v} \right) + \Delta R_w}{\gamma P \left(\frac{P_s}{P} \right)^{0,5} f_z (v - u_D)} \right\}^{-1} \quad (32)$$

em que u_D é a pressão de saturação de vapor na temperatura do ponto de orvalho (T_d), calculada pela equação 29, em (mb). A temperatura do ponto de orvalho foi calculada no REF-ET, desenvolvida por Allen, 2000.

Por meio de processo iterativo, a temperatura de equilíbrio foi calculada com base nas seguintes equações:

$$\delta T_p = \frac{\frac{R_w}{f_w} + v - v'_p + \lambda(T - T'_p)}{\Delta'_p - \lambda} \quad (33)$$

$$T_p = T'_p + \delta T_p \quad (34)$$

em que,

U'_p = pressão de saturação de vapor na temperatura de equilíbrio, (mb);

R_w = saldo de radiação na temperatura do ar, ($W m^{-2}$);

δT_p = correção de T'_p no processo iterativo; e,

T'_p = conjunto de valores de T_p no processo iterativo.

O processo iterativo foi repetido até que o valor de δT_p fosse inferior ou igual a 0,01 °C.

O saldo de radiação na temperatura do ar foi obtido pela diferença entre as radiações globais absorvidas e as perdas de ondas longas, a partir da equação:

$$R_w = (1-a)G - B \quad (35)$$

em que,

a = albedo médio, adimensional;

G = radiação global incidente, ($W m^{-2}$); e,

B = perda de radiação de ondas longas pela superfície solo-planta na temperatura do ar, ($W m^{-2}$).

A estimativa do albedo médio foi realizada pela seguinte expressão:

$$a = a_0 \left[S + (1-S) \left(1 - \frac{Z}{330} \right) \right] \quad (36)$$

em que,

S = razão entre a duração de brilho solar observado e a duração máxima de brilho solar, adimensional; e

Z = ângulo zenital ao meio-dia.

A radiação global incidente foi calculada a partir da radiação no topo da atmosfera, radiação global de céu claro e razão de insolação, de acordo com a equação:

$$G = S G_0 (0,08+0,30S)(1-S)G_E \quad (37)$$

em que,

G = radiação global incidente, ($W m^{-2}$);

G_0 = radiação solar à superfície para céu claro, ($W m^{-2}$); e,

G_E = radiação solar no topo da atmosfera, ($W m^{-2}$).

A radiação solar à superfície para céu claro foi obtida pela:

$$G_0 = G_E \tau \left[1 + \left(1 - \frac{\tau}{\tau_a} \right) (1 + a_0 \tau) \right] \quad (38)$$

em que,

τ = transmitância do céu claro para a radiação solar direta;

τ_a = fração absorvida da transmitância de céu claro; e,

a_0 = albedo para dia de céu claro.

A radiação solar no topo da atmosfera foi calculada pela equação:

$$G_E = \left(\frac{1354}{\eta^2} \right) \left(\frac{\omega}{180} \right) \cos z \quad (39)$$

em que,

η = raio vetor do sol;

ω = deslocamento angular da terra do meio-dia ao por do sol; e,

z = ângulo zenital médio diário.

O raio vetor do sol foi obtido pela seguinte equação:

$$\eta = 1 + \left(\frac{1}{60} \right) \text{sen}(29,5 i - 106) \quad (40)$$

em que i corresponde ao número do mês do ano.

O albedo para a condição de céu claro foi estimada pela equação:

$$a_0 = \frac{0,11 \left[\exp 1,08 - \left(\frac{2,16 \cos Z}{\pi + \sin Z} \right) \exp(0,012 Z) \right]}{1,473(1 - \sin Z)} \quad (41)$$

A transmitância para condição de céu claro foi calculada em conformidade com a equação:

$$\tau = \exp \left\{ -0,089 \left[\frac{P}{P_s} \right]^{0,75} - 0,083 \left(\frac{j}{\cos Z} \right)^{0,90} - 0,0288 \left(\frac{\omega}{\cos Z} \right)^{0,60} \right\} \quad (42)$$

A fração da transmitância na condição de céu claro foi calculada pela equação a seguir:

$$\tau_a = \exp \left[-0,0415 \left(\frac{j}{\cos Z} \right)^{0,90} - (0,0029)^{0,5} \left(\frac{\omega'}{\cos Z} \right)^{0,3} \right] \quad (43)$$

em que,

j = coeficiente de turbidez, adimensional; e,

ω' = vapor de água precipitável.

Os vários ângulos e funções necessários para a estimativa da radiação global ($W m^{-2}$) foram calculados de acordo com as seguintes equações:

$$\theta = 23,2 \sin(29,5 i - 94) \quad (44)$$

$$\cos Z = \cos(\phi - \theta) \quad (45)$$

$$\cos \omega = 1 - \frac{\cos Z}{\cos \phi \cos \theta} \quad (46)$$

$$\cos z = \cos Z + \left[\left(\frac{180}{\pi} \right) \frac{\sin \omega}{\omega} - 1 \right] \cos \phi \cos \theta \quad (47)$$

em que ,

θ = a declinação do sol;

ϕ = latitude em radianos.

O vapor de água precipitável e os coeficientes de turbidez foram obtidos por:

$$\omega' = \frac{v_D}{0,49 + \frac{T}{129}} \quad (48)$$

$$j = [0,5 + 2,5 \cos^2 z] \exp \left[21 - T \left(\frac{P}{P_s} - 1 \right) \right] \quad (49)$$

A perda de radiação de ondas longas foi estimada pela equação:

$$B = 5,5 \cdot 10^{-8} (T+273)^4 \left[1 - \left(0,71 + 0,007 v_D \frac{P}{P_s} \right) (1 + \rho) \right] \quad (50)$$

em que ρ corresponde ao incremento na radiação atmosférica devido às nuvens.

Para condições de dias com altos índices de nebulosidade e umidade relativa alta, o incremento na radiação atmosférica devido às nuvens também é ajustado, sendo expresso pela equação:

$$\rho = 0,18 \left[\left(1 - 10 \left(\frac{v_D}{v} - S - 0,42 \right) \right) (1-S)^2 + 10 \left(\frac{v_D}{v} - S - 0,42 \right) (1-S)^{0,5} \right] P_s / P \quad (51)$$

Obteve-se, pela equação 52, a evaporação potencial:

$$E_p = R_w - \lambda f_w (T_p - T) \quad (52)$$

em que λ é o coeficiente de transferência de calor.

O coeficiente de transferência de calor foi estimado de acordo com a equação:

$$\lambda = 0,66 \frac{P}{P_s} + \frac{22,0 \cdot 10^{-8} (T+273)^3}{f_w} \quad (53)$$

3.3.6 Tanque Classe A

A estimativa de evaporação no reservatório (mm por mês) pelo método do Tanque Classe A foi realizada de acordo com a seguinte equação:

$$E_L = k_p \text{ ECA} \quad (54)$$

em que,

k_p = coeficiente do tanque, adimensional; e,

ECA = evaporação no tanque Classe A, (mm por mês).

Os coeficientes de tanque comumente utilizados na estimativa da evaporação de lagos possuem uma faixa de variação. Na literatura são indicados valores próximos a 0,8, para regiões com altos índices pluviométricos, e 0,6 para regiões mais áridas. Neste trabalho foram avaliados diferentes valores do coeficiente (0,4, 0,6 e 0,8) a fim de verificar se para regiões áridas e semiáridas o valor 0,6 é realmente o mais representativo, como referenciado na literatura.

Esse método foi utilizado apenas para a estação Sobradinho, pois era a única que possuía dados de evaporação obtidos do tanque Classe A.

3.4 Estimativa da vazão equivalente a lâmina evaporada

A partir das estimativas da quantidade de água evaporada e conhecidas as áreas de acumulação dos reservatórios (fornecida pela CHESF e CEMIG), foram obtidas as vazões médias equivalente a lâmina evaporada, em cada um dos modelos utilizados, a partir da seguinte equação:

$$Q_{ev} = \frac{E_v A_r}{86400} \quad (55)$$

em que,

Q_{ev} = vazão média equivalente a lâmina evaporada no reservatório, ($m^3 s^{-1}$);

E_v = taxa de evaporação do reservatório, ($m d^{-1}$); e,

A_r = área de acumulação do reservatório média mensal, (m^2).

Os dados relativos às áreas de acumulação dos reservatórios de Sobradinho e Três Marias encontram-se disponíveis no Apêndice A.

3.5 Análise de sensibilidade

No presente trabalho seguiu-se a mesma metodologia apresentada por Silva et al. (2009) e Lelis et al. (2012) para realizar a análise de sensibilidade de cada parâmetro individualmente.

Dessa forma, foi realizada nos modelos Penman, Linacre, Kohler et al., Thornthwaite e CRLE a análise de sensibilidade para cada parâmetro de entrada dos modelos, como: precipitação, temperatura média, velocidade do vento e insolação, variando-os individualmente, ao passo que os outros eram mantidos constantes. Para a elaboração dos gráficos os valores de entrada dos parâmetros foram alterados em 10, 20, 30 40 e 50%, tanto para positivo quanto para negativo, a partir da média de longo período dos valores medidos nas estações.

Foi calculado o índice de sensibilidade (IS), pela equação 56, para cada variável com a finalidade de quantificar a sensibilidade de cada parâmetro nos diferentes modelos. De acordo com Evangelista (2003), quanto maior

são os valores de IS, em módulo, maior é a sensibilidade do modelo às mudanças de valores de um parâmetro, e quando mais próximos de zero indicam que o modelo não apresenta sensibilidade ao parâmetro.

$$IS = \left| \frac{\frac{R_1 - R_2}{R_{12}}}{\frac{l_1 - l_2}{l_{12}}} \right| \quad (56)$$

em que,

IS = índice de sensibilidade do modelo aos parâmetros de entrada, adimensional;

R_1 = evaporação no reservatório com o valor do parâmetro a -50% do medido na estação, (mm);

R_2 = evaporação no reservatório com o valor do parâmetro a 50% do medido na estação, (mm);

R_{12} = evaporação no reservatório com o valor do parâmetro medido, (mm);

l_1 = valor do parâmetro a -50% do medido;

l_2 = valor do parâmetro a 50% do medido;

l_{12} = valor do parâmetro medido.

3.6 Comparação entre os modelos

A comparação entre os modelos Linacre, Kohler et al., Thornthwaite, CRLE, Penman e Tanque Classe A foi realizado por meio de análise de regressão. Foram elaborados gráficos de dispersão para comparar os resultados de evaporação obtidos por cada modelo e ajustou-se uma regressão linear simples, forçando a reta a passar pela origem, ou seja, eliminando o valor da constante ($\beta_0 = 0$).

Posteriormente, foram analisados os coeficientes de determinação (R^2) e o coeficiente angular (β_1) das respectivas regressões lineares, que foram encontradas para as relações entre as evaporações estimadas por cada modelo em cada um dos reservatórios considerados no estudo. O

coeficiente angular foi testado a 5% de probabilidade pelo teste “t”, para avaliar se ele é estatisticamente igual à unidade ($\beta_1 = 1$).

Um estudo foi realizado com as estações meteorológicas localizadas ao entorno dos reservatórios, com a finalidade de constatar se as mesmas podem ser utilizadas como fonte de dados quando não houver instalada no reservatório uma estação meteorológica. Para o reservatório de Sobradinho, consideraram-se duas estações localizadas nas cidades vizinhas, sendo uma em Remanso e a outra em Petrolina. Para a reservatório de Três Marias consideraram-se três estações: Três Marias (localizada na cidade, monitorada pelo INMET), Curvelo e Pompéu.

Para fazer esta análise, foram realizados gráficos de dispersão com os resultados de evaporação estimados a partir da estação meteorológica localizada no reservatório, com a média dos resultados calculados pelas estações localizadas no entorno dos mesmos. Também ajustou-se uma regressão linear simples com os resultados de evaporação estimados pelas estações. Da mesma forma que foi feita a comparação entre os modelos, a constante β_0 foi considerada nula e o coeficiente angular foi testado a 5% de probabilidade pelo teste “t”.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização climática da região dos reservatórios

Na Figura 6, encontram-se as variações dos parâmetros climáticos relativos ao reservatório de Sobradinho para o período de 1980 a 2012. Em relação ao comportamento da precipitação evidenciada no período, Figura 6a, observa-se que as maiores lâminas precipitadas ocorrem no verão, principalmente, nos meses de janeiro, fevereiro e março, e a partir deste mesmo mês as reduções são significativas no total mensal precipitado. O período de estiagem é longo, sendo registrado nos meses de maio, junho, julho e agosto índices menores que 10 mm.

A menor temperatura média ocorre em julho, de 24°C. De outubro a fevereiro são registrados os maiores valores de temperatura média, da ordem de 28°C (Figura 6b).

A variação da insolação encontra-se na Figura 6c. Outubro é o mês de maior insolação, apresentando uma média de 9h de radiação que atinge a superfície. Os menores valores de insolação são registrados nos meses de maio, março e junho.

Na Figura 6d o comportamento anual da velocidade do vento pode ser visualizada. A velocidade do vento média para a região é de 2,2 m s⁻¹. O mês de março é o que apresenta a menor velocidade do vento, de 1,3 m s⁻¹, já em setembro os valores chegam a 3,1 m s⁻¹.

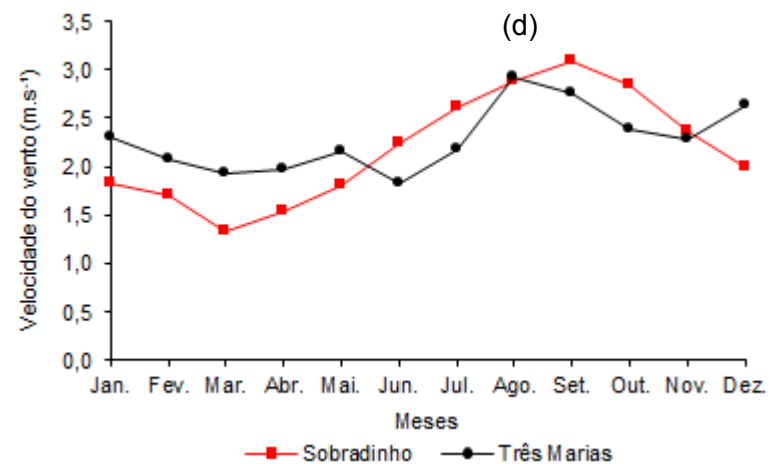
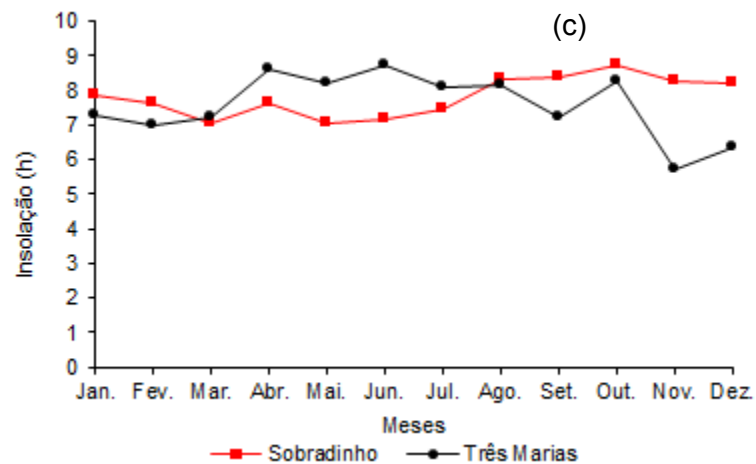
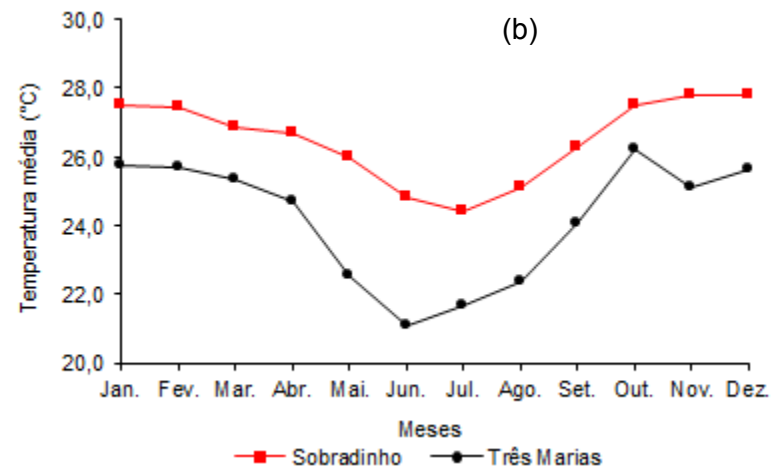
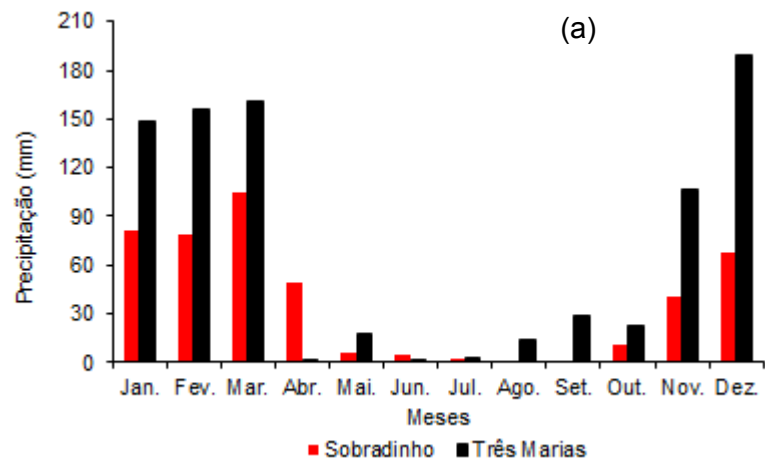


Figura 6 - Variação da precipitação (a), temperatura média (b), insolação (c) e velocidade do vento (d) na estação Sobradinho – BA, considerando-se o período de 1980 a 2012 e na estação Três Marias – MG para o período 2000, 2001 e 2002.

As variações dos parâmetros climáticos, relativos ao reservatório de Três Marias para o período de 2000, 2001 e 2002 encontram-se também na Figura 6. Analisando a variação da precipitação no período, Figura 6a, observa-se que os meses mais chuvosos correspondem ao verão, ou seja, dezembro, janeiro, fevereiro e março. Já em abril a chuva diminui, inicia-se o período seco e só a partir de outubro os índices tornam a aumentar. Em abril, maio e junho a precipitação é menor que 5 mm.

A maior temperatura média do ano ocorre no mês de outubro, atingindo 26°C, seguido pelos meses de dezembro, janeiro e fevereiro. O mês no qual é observado as menores temperaturas é junho, chegando a atingir 21°C de temperatura média (Figura 6b).

Na Figura 6c encontra-se a variação da insolação. Nos meses de abril, maio, junho, julho e agosto, são os que apresentam maior insolação, acima de 8,5h. Novembro é o mês com menor número médio de horas, apenas 5,7h, seguido por dezembro com 6,4h.

O comportamento anual da velocidade do vento pode ser visualizada na Figura 6d. A velocidade do vento média para a região é de 2,3 m s⁻¹. O mês de junho é o que apresenta a menor velocidade média do vento, de 1,8 m s⁻¹, enquanto no mês de agosto os valores médios chegam a 2,9 m s⁻¹.

4.2 Evaporação nos reservatórios de Sobradinho – BA e Três Marias – MG

Na Figura 7 estão apresentadas as estimativas da evaporação no reservatório de Sobradinho por meio dos modelos Penman, Linacre, Kohler et al., Thornthwaite e CRLE e pelo método do tanque Classe A (ECA), utilizando três valores de coeficientes de tanque (k_p): 0,4, 0,6, e 0,8. Os resultados de evaporação para todos os anos considerados nas análises estão disponíveis no Apêndice B.

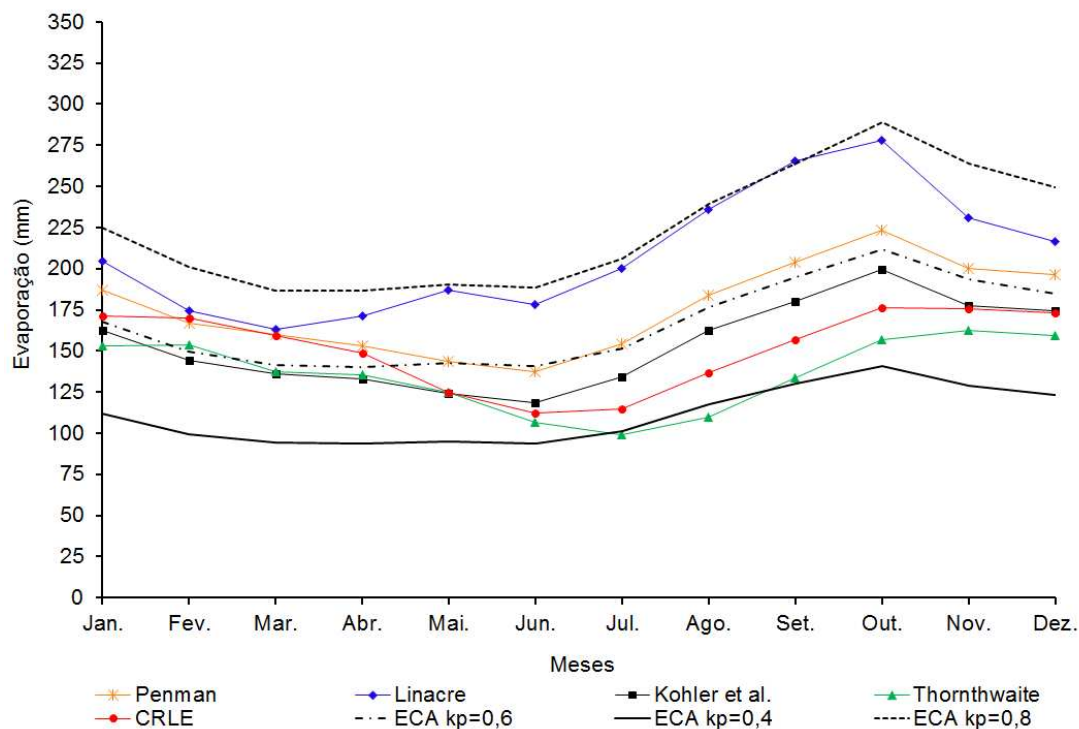


Figura 7 - Evaporação mensal média (mm) no reservatório de Sobradinho para o período de 1980 a 2012 estimada pelos modelos Penman, Linacre, Kohler et al., Thornthwaite e CRLE e pelo método do tanque Classe A.

Em decorrência da não adoção de um modelo ou método padrão, devido à grande extensão dos reservatórios que dificulta a aplicação do balanço hídrico e pelo fato dos modelos serem apenas aproximações, foi realizada uma comparação entre cada modelo além de verificar quais deles apresentavam um comportamento semelhante ao de Penman. No presente trabalho o modelo de Penman foi adotado como referência por apresentar uma base física mais realista e ser citado em várias literaturas como o que melhor representa a evaporação quando comparado aos métodos padrão.

Todos os modelos seguiram comportamento similar ao observado no modelo de Penman, ou seja: tiveram altos valores de evaporação em janeiro, decrescendo ao longo dos meses até atingir o valor mínimo no inverno, aumentando a partir daí até meados de outubro, no qual se atinge a máxima evaporação. O modelo de Penman, ao longo do ano, obteve resultados que ficaram entre aqueles obtidos por Kohler et al. e Linacre, provavelmente por estes modelos serem simplificações da equação original.

De modo geral, é evidenciado na Figura 7 um expressivo aumento da evaporação mensal a partir do mês de julho em quase todos os modelos, com exceção do modelo Thornthwaite, no qual o aumento ocorre a partir de agosto. O valor máximo para Thornthwaite ocorre em novembro, para os demais modelos ele é atingido no mês de outubro. Baseando na Figura 6, observa-se que maiores valores de insolação, temperatura e velocidade do vento associados com a baixa precipitação ocorrem no mês de outubro em Sobradinho, o que justifica o pico de evaporação nesse mês. A partir de então, a redução é prolongada até os meses onde o aumento é evidenciado. Em junho, os valores foram mínimos em quase todos os modelos, com exceção de Linacre, que foi em março, e Thornthwaite, em julho.

Junho, o mês de menor evaporação pela maioria dos modelos, correspondeu ao final do período chuvoso. Como pode-se perceber na Figura 6, foi um mês caracterizado por baixos valores de precipitação, temperatura e insolação, bem como velocidade do vento correspondente a média anual em Sobradinho.

O fato do modelo de Thornthwaite estimar a menor taxa de evaporação em julho pode ser explicada pela equação levar em consideração apenas os valores de temperatura média do ar. Dessa forma, no inverno o modelo tende a fornecer menores valores de evaporação, inclusive no mês de julho, em que a temperatura média do ar ainda é baixa, como ocorre em Sobradinho.

Os valores de evaporação anual no reservatório de Sobradinho encontram-se dispostos, em ordem decrescente, na Tabela 3.

Tabela 3 - Evaporação anual (mm) no reservatório de Sobradinho estimada pelo método do Tanque Classe A e pelos modelos Penman, Linacre, Kohler et al., Thornthwaite e CRLE para o período de 1980 a 2012

Modelos	Evaporação anual (mm)
Tanque Classe A ($k_p=0,8$)	2.690,4
Linacre	2.505,0
Penman	2.108,0
Tanque Classe A ($k_p=0,6$)	1.994,7
Kohler et al.	1.846,4
CRLE	1.819,0
Thornthwaite	1.632,0
Tanque Classe A ($k_p=0,4$)	1.329,8

A evaporação anual estimada pelos modelos Kohler et al. e CRLE foram próximas, com diferença de 27 mm. Os modelos Penman, Kohler et al., CRLE e o método do tanque Classe A ($k_p = 0,6$) foram os que obtiveram resultados semelhantes.

Na Tabela 4 estão dispostas as estimativas do coeficiente angular ($\hat{\beta}_1$) das respectivas regressões lineares, que foram encontradas para as relações entre as evaporações estimadas por cada modelo no reservatório de Sobradinho. O coeficiente angular foi testado a 5% de probabilidade pelo teste “t”, para avaliar se os modelos estimam resultados estatisticamente iguais ou estatisticamente diferentes. O resultado do teste também está indicado na Tabela 4. Encontra-se disponível no Apêndice C, o resultado da análise de regressão entre os modelos Penman, Linacre, Kohler et al., Thornthwaite, CRLE e Tanque Classe A, para Sobradinho.

Tabela 4 - Valores de $\hat{\beta}_1$ estimados a partir da comparação entre cada modelo, por meio da equação da reta $\hat{Y} = \hat{\beta}_1 X$, para o reservatório de Sobradinho – BA

Modelos	\hat{X}				
	Penman	Linacre	Kohler et al.	Thornth.	CRLE
Linacre	1,187*	-	-	-	
Kohler et al.	0,878*	0,733*	-	-	
Thornth.	0,769*	0,637*	0,875*	-	
CRLE	0,859*	0,712*	0,978 ^{ns}	1,113*	-
ECA 0,4	0,63*	0,528*	0,718*	0,804*	0,724*
ECA 0,6	0,945*	0,792*	1,077*	1,207*	1,086 ^{ns}
ECA 0,8	1,276*	1,069*	1,455*	1,628*	1,465*

* a diferença entre os modelos é significativa pelo teste t a 5% de probabilidade, ^{ns} os modelos não diferem significativamente pelo teste t a 5% de probabilidade. Thornth.: representa o modelo de Thornthwaite.

Com base nos resultados apresentados na Tabela 4 fica evidente que nenhum dos modelos obteve resultados estatisticamente iguais ao modelo de Penman, tomado como referência. O modelo Linacre e o método do tanque Classe A, utilizando o coeficiente igual a 0,8, são os únicos que estimam valores de evaporação superiores. A maior discrepância foi proporcionada pelo ECA ($k_p=0,8$), no qual a evaporação é superestimada em 27,6%, enquanto Linacre superestima em 18,7%.

Os resultados obtidos pelos modelos Kohler et al., CRLE, Thornthwaite e pelo método tanque Classe A, com $k_p = 0,6$ e $k_p = 0,4$, são subestimados em relação a Penman. A maior diferença nos resultados é com relação ao ECA ($k_p=0,4$) e Thornthwaite, nos quais os valores encontrados são inferiores a Penman em 36,9% e 23,1%, respectivamente. Já os modelos CRLE, Kohler et al. e ECA ($k_p=0,6$) subestimaram os valores obtidos de Penman em 14,1%, 12,3% e 5,5%, respectivamente.

Continuando a análise da Tabela 4, fica evidente estatisticamente que o modelo Linacre superestima os resultados de evaporação em relação aos demais modelos, com exceção do método do tanque Classe A (ECA) quando se utiliza o k_p igual a 0,8. Ao utilizar este coeficiente, o tanque superestima os resultados obtidos por Linacre em 6,9%. Como na Literatura

é indicado utilizar este coeficiente apenas para regiões chuvosas, fica claro no trabalho que para regiões mais secas o resultado está superestimado. Pela pouca diferença percentual entre Linacre e ECA ($k_p=0,8$), pode-se afirmar que o modelo Linacre não é o mais indicado para a estimativa da evaporação no reservatório de Sobradinho.

Analisando quantitativamente cada modelo, Linacre, superestima o ECA ($k_p=0,4$) em 89,4%, Thornthwaite em 56,9%, CRLE em 40,4%, Kohler et al. em 36,4% e ECA ($k_p=0,6$) em 26,3%.

Os resultados obtidos pelo modelo de Kohler et al. são subestimados em relação ao método ECA ($k_p =0,6$) e ECA ($k_p=0,8$), já em relação ao CRLE, são estatisticamente iguais. Kohler et al. superestima a evaporação obtida por Thornthwaite em 14,3% e o ECA ($k_p=0,4$) em 39,3%. A evaporação estimada por ECA ($k_p=0,8$), é aproximadamente 45,4% superior e pelo ECA ($k_p=0,6$) é apenas 7,7% superior ao modelo de Kohler et al..

O modelo de Thornthwaite subestima as estimativas da evaporação em relação aos outros modelos, com exceção do método do tanque Classe A quando se utiliza um coeficiente de 0,4. Este modelo subestima os resultados com relação ao ECA ($k_p=0,8$) em 62,8%. Já o ECA ($k_p=0,6$) e o CRLE superestimam os resultados em 20,7% e 11,3% respectivamente. Ao utilizar o valor de 0,4 como coeficiente do tanque, os resultados são subestimados em 19,5% com relação a Thornthwaite, indicando não ser adequado para a estimativa da evaporação na região, ainda mais por ser um valor abaixo do recomendado na literatura para regiões semiáridas e áridas.

Os resultados encontrados neste trabalho condizem com Thornthwaite (1948), que explica que a equação foi desenvolvida para condições de clima úmido, sendo assim apresenta subestimativa da evaporação em climas secos, que é o caso de Sobradinho.

Ainda, analisando os dados da Tabela 4, percebe-se que o modelo CRLE e o tanque Classe A com o coeficiente de 0,6, apresentam resultados de evaporação que não diferem estatisticamente.

Os resultados apresentados diferem dos encontrados por Pereira (2004), no qual apontam o modelo CRLE como o mais discrepante e o modelo Kohler et al. como o mais indicado para o reservatório de Sobradinho. Após a atualização dos dados utilizados na pesquisa realizada por Pereira et al.

(2009), no reservatório de Sobradinho, o modelo que mais se aproximou do modelo de Penman foi o ECA ($k_p=0,6$), mas mesmo assim não foram estatisticamente iguais.

Tendo em vista os diferentes coeficientes do tanque utilizados, o que melhor representou a lâmina evaporada para a região de Sobradinho foi $k_p = 0,6$, uma vez que o $k_p = 0,8$ estimou lâminas superiores a todos os modelos e o $k_p = 0,4$ estimou lâminas inferiores, além de ser o coeficiente que estima resultados próximos ao modelo de Penman. Tais resultados corroboram com as pesquisas científicas que apontam o coeficiente 0,6 como o mais representativo para regiões áridas. Pereira et al. (2009) indicaram o coeficiente de 0,57 como o mais representativo para o reservatório de Sobradinho, reafirmando o resultado encontrado no presente trabalho.

Na Figura 9 estão apresentadas as estimativas da evaporação para o reservatório de Três Marias – MG pelos modelos Penman, Linacre, Kohler et al., Thornthwaite e CRLE. Os resultados de evaporação para todos os anos considerados nas análises estão disponíveis no Apêndice D.

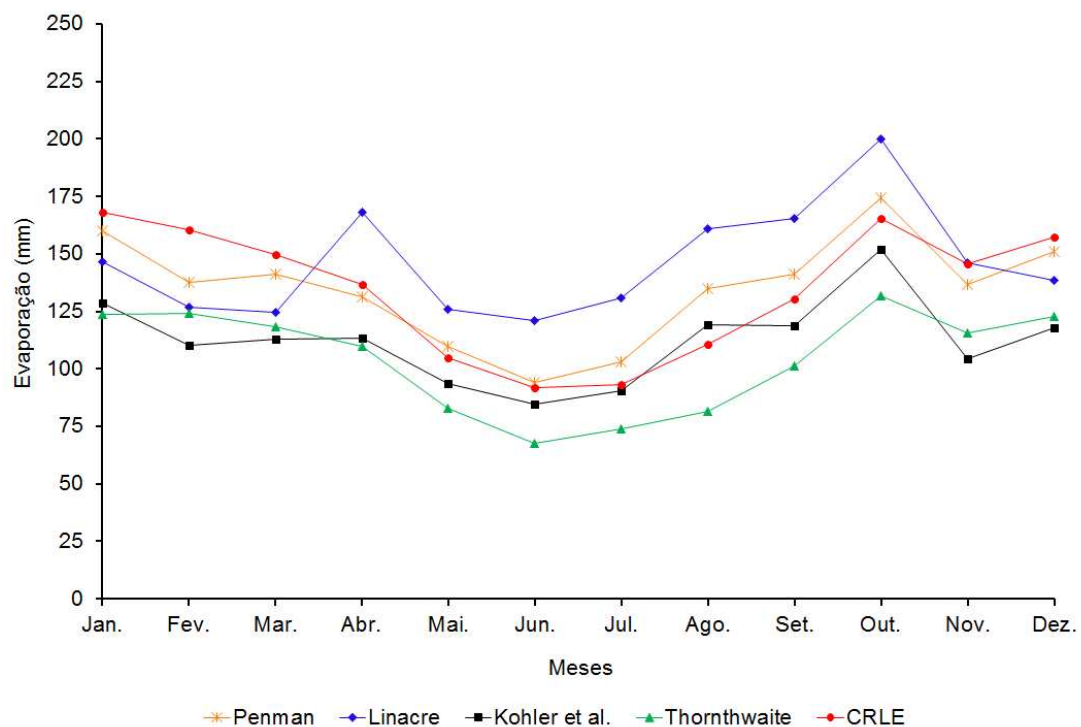


Figura 8 - Evaporação mensal média (mm) no reservatório de Três Marias estimada pelos modelos Penman, Linacre, Kohler et al., Thornthwaite e CRLE, para os períodos de 2000, 2001 e 2002.

Na Figura 8, é notório um expressivo aumento da evaporação mensal a partir do mês de julho, em todos os modelos, até o mês de outubro. A partir do mês de janeiro, os valores de evaporação apresentam um ligeiro decréscimo até abril, tornando-se mais acentuado até junho. O valor mínimo ocorre em junho, para todos os modelos, justamente no mês em que os menores índices de insolação, temperatura e velocidade do vento junto com a baixa precipitação foram registrados em Três Marias (Figura 6). Nesse mês, equações de Penman, Kohler et al. e CRLE estimaram valores semelhantes. Thornthwaite estimou a menor taxa de evaporação e Linacre uma taxa mais elevada.

A evaporação máxima é observada em outubro, com exceção do CRLE que corresponde ao mês de janeiro. Em outubro ocorreu os maiores valores de insolação e temperatura, a velocidade do vento ficou próxima da média anual e a precipitação ainda encontrava-se baixa em Três Marias (Figura 6). Em abril é evidenciado um pico de evaporação no modelo de Linacre, provavelmente por não ter sido registrada nenhuma lâmina precipitada no mês, já que o modelo leva em consideração este parâmetro.

Os valores de evaporação anual no reservatório de Três Marias encontram-se dispostos, em ordem decrescente, na Tabela 5.

Tabela 5 - Evaporação anual (mm) no reservatório de Três Marias pelos modelos Penman, Linacre, Kohler et al., Thornthwaite, e CRLE, para o período de 2000, 2001 e 2002

Modelos	Evaporação anual (mm)
Linacre	1.754,3
Penman	1.615,0
CRLE	1.613,0
Kohler et al.	1.345,7
Thornthwaite	1.253,0

A evaporação anual, estimada pelos modelos CRLE e Penman, apresentaram diferença de apenas 2 mm. Os demais modelos obtiveram valores mais distintos de evaporação anual.

Na Tabela 6, são apresentadas as estimativas do coeficiente angular ($\hat{\beta}_1$) das respectivas regressões lineares, que foram encontradas para as relações entre as evaporações estimadas por cada modelo no reservatório de Três Marias. O coeficiente angular foi testado a 5% de probabilidade pelo teste “t”, estando indicado o resultado do teste na Tabela 6. Encontra-se disponível no Apêndice E, o resultado da análise de regressão entre os modelos Penman, Linacre, Kohler et al., Thornthwaite, CRLE, para Três Marias.

Tabela 6 - Valores de $\hat{\beta}_1$ estimados a partir da comparação entre cada modelo, por meio da equação da reta $\hat{Y} = \hat{\beta}_1 X$, para o reservatório de Três Marias – MG

	Modelos	\hat{X}			
		Penman	Linacre	Kohler et al.	Thornthwaite
\hat{Y}	Linacre	1,094*	-	-	-
	Kohler et al.	0,831*	0,764*	-	-
	Thornthwaite	0,778*	0,706*	0,931 ^{ns}	-
	CRLE	1,001 ^{ns}	0,908*	1,198*	1,286*

* a diferença entre os modelos é significativa pelo teste t a 5% de probabilidade, ^{ns} os modelos não diferem significativamente pelo teste t a 5% de probabilidade.

A partir dos resultados apresentados na Tabela 6, fica comprovado estatisticamente que o único modelo que superestima a evaporação calculada por Penman é o modelo Linacre em 9,4%. Já os modelos Kohler et al. e Thornthwaite subestimam as lâminas evaporadas em 16,9% e 22,1% respectivamente. Os modelos de Penman e CRLE estimam valores de evaporações que não diferem estatisticamente.

O modelo Linacre superestima os resultados de evaporação obtidos por todos os outros modelos. As diferenças mais discrepantes são com relação aos modelos de Thornthwaite e Kohler et al., no qual as estimativas são subestimadas em 29,4% e 23,6%. Já o modelo CRLE subestima o resultado em relação à Linacre em 9,2% apenas.

Tomando como base o modelo de Kohler et al., a evaporação é subestimada em relação ao modelo CRLE em 16,5%. Thornthwaite e Kohler

et al. estimam resultados estatisticamente iguais e o modelo CRLE superestima Thornthwaite em 28,5%.

De forma geral, para o reservatório de Três Marias o modelo Linacre superestima a evaporação em relação a todos os outros modelos e o de Thornthwaite subestima em relação a quase todos. Portanto estes não são os modelos mais indicados para prever o processo evaporativo em Três Marias. Os modelos de Penman e CRLE estimam resultados estatisticamente iguais e o modelo de Kohler et al. subestima os resultados.

Os reservatórios de Três Marias – MG e Sobradinho – BA se localizam em duas regiões hidrográficas distintas no rio São Francisco (alto e submédio São Francisco, respectivamente), portanto, diferenças entre os percentuais de evaporação por cada modelo são esperadas. Assim, as diferenças observadas nas taxas anuais evaporadas entre os reservatórios foram: 750,7 mm pelo modelo Linacre, 500,7 mm por Kohler et al., 493 mm por Penman, 379 mm por Thornthwaite e 206 mm pelo CRLE.

De modo geral, o modelo Linacre tendeu a uma maior estimativa da evaporação em quase todos os meses do ano (principalmente no período seco) para o reservatório de Três Marias, já para Sobradinho, a evaporação foi maior em todos os meses. As menores estimativas, para ambos os reservatórios, foram observadas no modelo de Thornthwaite.

Varejão-Silva (2006) faz críticas relacionadas à equação de Thornthwaite (1948), alertando que este método fornece apenas uma aproximação da ordem de grandeza que se deseja conhecer, pois não considera parâmetros intervenientes ao processo da evapotranspiração bem como na evaporação.

4.3 Análise de sensibilidade dos modelos Penman, Linacre, Kohler et al., Thornthwaite e CRLE, aos parâmetros climáticos relativos à insolação, temperatura do ar, precipitação e velocidade do vento

Na Tabela 7 é apresentado o Índice de Sensibilidade – IS dos modelos à insolação, temperatura do ar, precipitação e velocidade do vento.

Tabela 7 - Índice de sensibilidade (IS) dos modelos Penman, Linacre, Kohler et al., Thornthwaite, e CRLE aos parâmetros climáticos: insolação, temperatura, precipitação e velocidade do vento

Modelos	IS – Índice de Sensibilidade			
	Insolação	Temperatura	Precipitação	Velocidade do vento
Linacre	-	0,47	0,08	0,26
Kohler et al.	0,48	0,56	-	0,24
Thornthwaite	-	20,48	-	-
CRLE	0,51	0,64	-	-
Penman	0,30	0,61	-	0,27

Analisando os dados da Tabela 7 percebe-se que: a) o modelo Thornthwaite é o mais sensível a variações na temperatura do ar; b) o modelo CRLE é sensível a mudanças na insolação e temperatura; c) o modelo Kohler et al. e Penman são sensíveis à insolação, temperatura e velocidade do vento; e d) o modelo Linacre é o único que leva em consideração a precipitação.

A sensibilidade do modelo Linacre à velocidade do vento foi de 0,26, índice semelhante ao modelo de Penman e Kohler et al., que atingiram valores de 0,24 e 0,27 (respectivamente) como pode ser visualizado na Tabela 7. Pelos valores de IS terem sido tão semelhantes, a velocidade do vento não foi uma variável determinante na diferença entre os três modelos citados acima. Foi determinante apenas para o modelo CRLE nos meses de julho a outubro em Sobradinho. Como o modelo CRLE não considera esse parâmetro climático, tal fator pode ter contribuído para a baixa estimativa da evaporação por este modelo nos meses citados, já que neles a velocidade do vento atinge as maiores taxas e, quanto maior é a velocidade que o vento atinge, maior é a evaporação. E nos outros meses em que a velocidade do vento diminui, a evaporação estimada pelos modelos Penman, Linacre e Kohler et al. diminuem e o modelo CRLE aumenta.

Em relação a análise de sensibilidade à insolação (Tabela 7), o modelo CRLE foi o mais sensível, apresentando valor de IS igual a 0,51, seguido pelo modelo de Kohler et al. e Penman, com IS de 0,48 e 0,30. Já em relação à temperatura, a maior sensibilidade é do modelo de Thornthwaite, atingindo um IS de 20,48, cerca de 36 vezes mais sensível que os demais. Os outros modelos possuem sensibilidade próxima (CRLE, 0,64, Penman,

0,61 e Kohler et al., 0,57), sendo Linacre o que apresenta sensibilidade mais baixa, igual a 0,47. A variação nos valores de temperatura do ar foi de $T = 26^{\circ}\text{C} \pm 50\%$.

Constata-se, ainda, que o modelo de Thornthwaite foi o único que apresentou maior estimativa da evaporação em novembro no reservatório de Sobradinho, já que para os demais modelos foi em outubro, fato que pode ser explicado pela sua alta sensibilidade à temperatura média do ar. Assim, analisando a Figura 6b do item 4.1, nota-se que realmente foi no mês de novembro que ocorreu o maior valor de temperatura observado.

Analisando os modelos CRLE e Kohler et al. verifica-se que a taxa de evaporação estimada pelos dois modelos são iguais nos meses de novembro e dezembro, provavelmente pelos valores de temperatura e insolação serem iguais nesses meses, e a velocidade do vento mais baixa. Já no período de julho a outubro, a estimativa pelo modelo Kohler et al. é maior que o modelo CRLE, provavelmente devido a alta velocidade do vento evidenciada. Os meses, que o modelo CRLE apresenta maiores estimativas em relação ao modelo de Kohler et al., vai de janeiro a abril, período em que a velocidade do vento atinge as menores taxas do ano (Figura 6d).

Os modelos Linacre e Kohler et al. são diferentes tipos de simplificações da equação de Penman, mas apenas o modelo Kohler et al. manteve-se sensível aos mesmos parâmetros de entrada que a equação original de Penman. Linacre em sua simplificação passou a estimar a radiação utilizando apenas dados de precipitação.

Nos meses de abril e maio, o modelo Linacre não seguiu a mesma tendência dos demais modelos, estimando taxas mais elevadas de evaporação. Isso provavelmente ocorreu por sua sensibilidade a precipitação, uma vez que nos dois meses os índices de chuva foram mínimos e tendo em vista que a precipitação e evaporação são inversamente proporcionais.

Em junho, os modelos Kohler et al., CRLE e Thornthwaite obtiveram maior proximidade na evaporação estimada, provavelmente pela baixa temperatura, uma vez que os três modelos são sensíveis ao parâmetro, e velocidade do vento não expressiva para a região.

A menor estimativa obtida pelo modelo Linacre foi em março. Devido a alta precipitação comprovada nesse mês, de 105 mm, correspondendo a aproximadamente 24% do total precipitado, junto com a baixa velocidade do vento de $1,3 \text{ m s}^{-1}$, podem ter feito com que o modelo apresentasse a menor taxa de evaporação. Para Thornthwaite, a menor estimativa observada foi em junho, justamente o mês em que a temperatura do ar foi mais baixa, de $24,4 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

Para o reservatório de Três Marias, foi observada uma oscilação na curva obtida pelo modelo Linacre, nos meses de janeiro, fevereiro, março, novembro e dezembro. Tal variação pode ser atribuída a precipitação, uma vez que o modelo é o único que apresenta sensibilidade a este parâmetro e tendo em vista que os dados relativos à insolação, temperatura e velocidade do vento apresentaram pouca variação, mas as taxas de precipitação foram altas por estar no período chuvoso (Figura 6a). Em abril houve um pico na evaporação por Linacre, provavelmente por não ter sido registrado nenhuma lâmina precipitada no mês.

Na Figura 9 encontram-se disponíveis os gráficos relativos à análise de sensibilidade aos parâmetros meteorológicos (insolação, temperatura, precipitação e velocidade do vento) de entrada nos modelos. Por meio das curvas apresentadas por cada modelo é possível perceber a resposta na evaporação quando se modifica os dados de entrada.

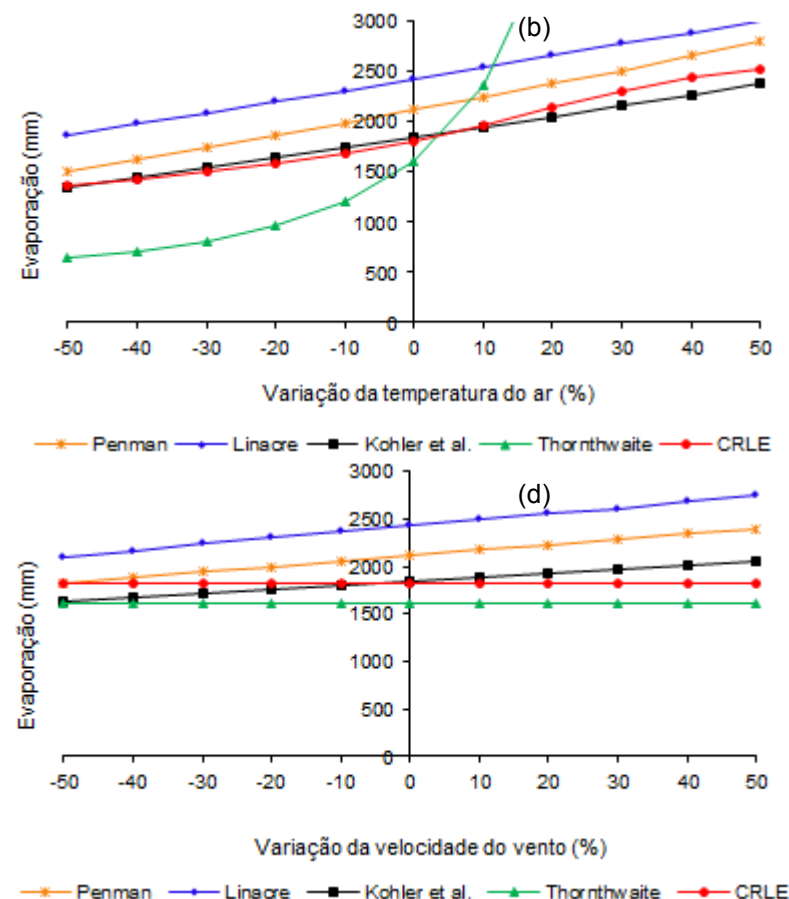
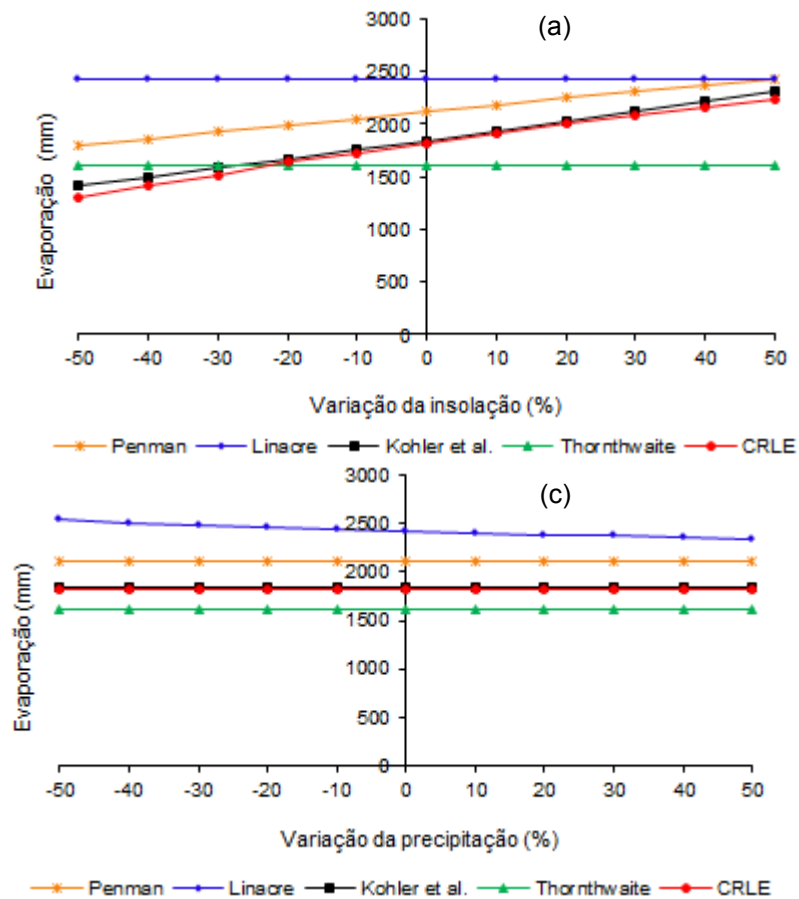


Figura 9 - Análise de sensibilidade relativa dos modelos Penman, Linacre, Kohler et al., Thornthwaite e CRLE aos parâmetros climáticos: insolação (a), temperatura do ar (b), precipitação (c) e velocidade do vento (d).

A variação de 10% dos valores de entrada relativos à insolação, tanto para positivo quanto negativo, repercute em uma variação nos resultados de evaporação de 3% para o modelo de Penman e 5% nos modelos de Kohler et al. e CRLE. Quando a variação nos dados de entrada foi de 50%, para positivo e negativo, ocorre uma mudança nos resultados da ordem de 15% para o modelo de Penman. Para os modelos Kohler et al. e CRLE as porcentagens não são as mesmas quando a variação é positiva ou negativa. Quando o valor de insolação é alterado em -50% os modelos Kohler et al. e CRLE alteram seus resultados em -23% e -28%, já quando a alteração no dado de entrada é de 50% os resultados dos dois modelos mudam 25% e 23% respectivamente. A inclinação das retas pode ser visualizada na Figura 9a.

Ao analisar as inclinações das retas na Figura 9b, fica evidente o quão mais sensível é o modelo de Thornthwaite às variações na temperatura média do ar, principalmente quando o parâmetro é alterado para positivo. Mudanças na temperatura do ar de $\pm 10\%$ alteram os resultados de evaporação pelo modelo Linacre, Penman, Kohler et al. em $\pm 5\%$, $\pm 6\%$, e $\pm 6\%$ respectivamente. As variações nos modelos CRLE e Thornthwaite são -7% e -20% quando a temperatura é alterada em -10% e 8% e 47% quando a alteração é positiva.

Variações de -50% no parâmetro alteram os resultados em -23%, -25%, -27% e -28% dos modelos Linacre, CRLE, Kohler et al. e Penman, respectivamente. Se a alteração é positiva, os resultados aumentam em 24%, 39%, 29% e 33% para a mesma sequência dos modelos. Para o modelo de Thornthwaite, variações na temperatura do ar de -50% diminuem a evaporação em 60%, já quando a variação é positiva a evaporação aumenta exorbitantemente, correspondendo a 400%. Essa grande variação nos resultados de evaporação se deve ao fato da equação do modelo ser exponencial, ou seja, quanto mais se eleva a temperatura média maior será o aumento na evaporação.

Como já discutido anteriormente, o modelo Linacre é o único que considera à precipitação, como também pode ser visto na Figura 9c. A precipitação é inversamente proporcional à evaporação, dessa forma mudanças de -10% aumentam a evaporação em 1% e quando a

precipitação aumenta em 10% a evaporação diminui 1%. Variações de 50% na precipitação diminuem a evaporação em 3,5% e se as chuvas reduzem em 50% a evaporação aumenta em 5%.

Em relação à velocidade do vento, a sensibilidade dos parâmetros são bem semelhantes. Variações de $\pm 10\%$ fornecem resultados com alterações de $\pm 2\%$, $\pm 3\%$ e $\pm 3\%$ nos modelos Kohler et al., Penman e CRLE enquanto que variações de $\pm 50\%$ alteram os resultados em $\pm 12\%$, $\pm 13\%$ e $\pm 13\%$ para os mesmos modelos.

4.4 Vazão equivalente a lâmina evaporada nos reservatórios relativos aos modelos Penman, Linacre, Kohler et al., Thornthwaite, CRLE, e ao método do tanque Classe A

Os valores de vazão anual média, equivalente a lâmina evaporada no reservatório de Sobradinho, são apresentados na Tabela 8. Como pode-se perceber, o maior valor de vazão evaporada foi obtido pelo modelo Linacre, correspondendo a $242 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e o menor valor para o modelo de Thornthwaite ($157 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). Os modelos de Kohler et al. e CRLE apresentaram valores bem próximos, com diferença de apenas $3 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

Tabela 8 - Vazão média anual evaporada no reservatório de Sobradinho - BA, estimada com o uso dos modelos Penman, Linacre, Kohler et al., Thornthwaite, CRLE e pelo método do tanque Classe A (ECA $k_p=0,6$)

Modelos	Vazão média anual evaporada ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$)
Linacre	242
Penman	203
ECA $k_p=0,6$	192
Kohler et al.	178
CRLE	175
Thornthwaite	157

Na Figura 10 é possível analisar a variação, ao longo do ano, das vazões médias mensais evaporadas. O maior pico de vazão foi observado em setembro no modelo Linacre, correspondendo a uma vazão de $289 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$,

cerca de 30% superior à vazão obtida por Penman no mesmo mês, 36%, 47%, 69% e 98% superiores aos modelos ECA $k_p = 0,6$, Kohler et al., CRLE e Thornthwaite, respectivamente. Também foi no mês de setembro que os modelos Penman, ECA e Kohler et al. registraram o maior pico de vazão evaporada, atingindo valores de $222 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, $212 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e $196 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, respectivamente. O maior pico de vazão evaporada ocorreu em setembro, diferentemente do que ocorre com a lâmina evaporada, devido a área de acumulação do reservatório que é maior em setembro do que em outubro. Já os modelos CRLE e Thornthwaite tiveram o pico de vazão em fevereiro, no qual o modelo CRLE atingiu o valor da ordem de $218 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e Thornthwaite um valor de $196,9 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

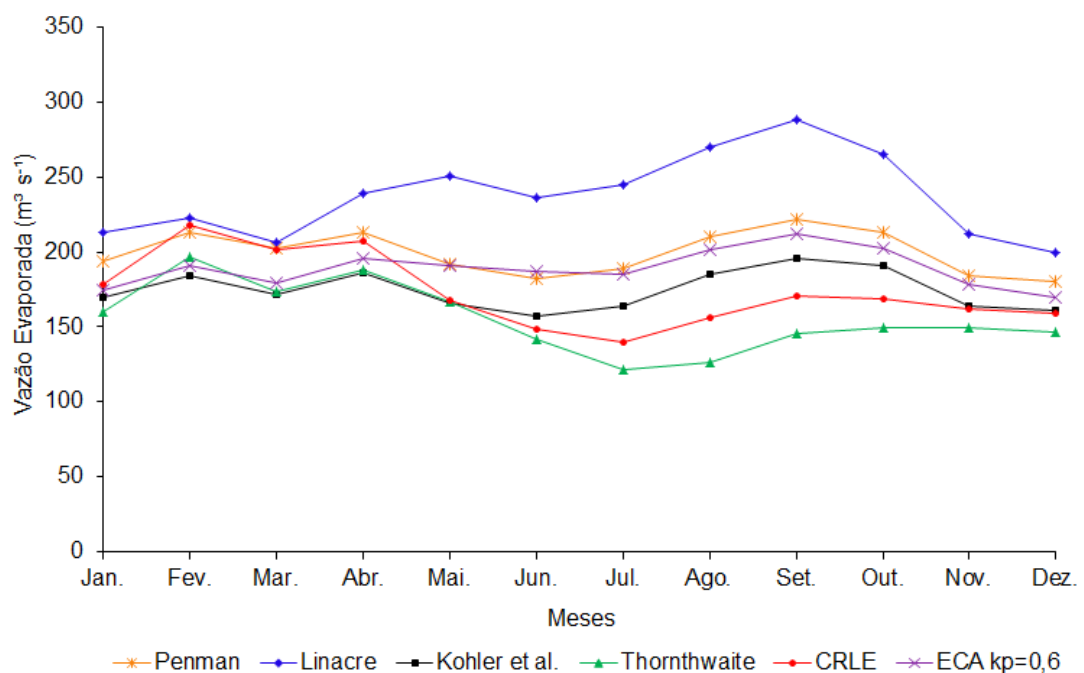


Figura 10 - Vazão evaporada ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$) no reservatório de Sobradinho – BA estimada pelos modelos Penman, Linacre, Kohler et al., Thornthwaite e CRLE e pelo método do tanque Classe A para os períodos de 1980 a 2012.

O estudo realizado corrobora com os resultados obtidos por Pereira et al. (2009), para o reservatório de Sobradinho, no qual a maior vazão líquida evaporada foi obtida pelo modelo de Linacre, comprovando a tendência deste modelo em superestimar os resultados.

Para o reservatório de Três Marias, os valores de vazão anual média equivalente a lâmina evaporada estão dispostos na Tabela 9. Assim como para Sobradinho, o maior valor de vazão evaporada em Três Marias foi obtido pelo modelo Linacre, correspondendo a $42 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e o menor valor para o modelo de Thornthwaite ($30 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). Os modelos de Penman e CRLE tiveram o mesmo valor de vazão média anual evaporada.

Tabela 9 - Vazão média anual evaporada no reservatório de Três Marias - MG, estimada com o uso dos modelos Penman, Linacre, Kohler et al., Thornthwaite e CRLE

Modelos	Vazão média anual evaporada ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$)
Linacre	42
Penman	39
CRLE	39
Kohler et al.	32
Thornthwaite	30

Na Figura 11 é possível analisar, para o reservatório de Três Marias, a variação no decorrer do ano das vazões médias mensais evaporadas. O maior pico de vazão foi observado em abril para o modelo Linacre, correspondendo a uma vazão de $56 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, cerca de 23% superior a vazão obtida pelo CRLE no mesmo mês, 27%, 48% e 53% superiores aos modelos Penman, Kohler et al. e Thornthwaite, respectivamente.

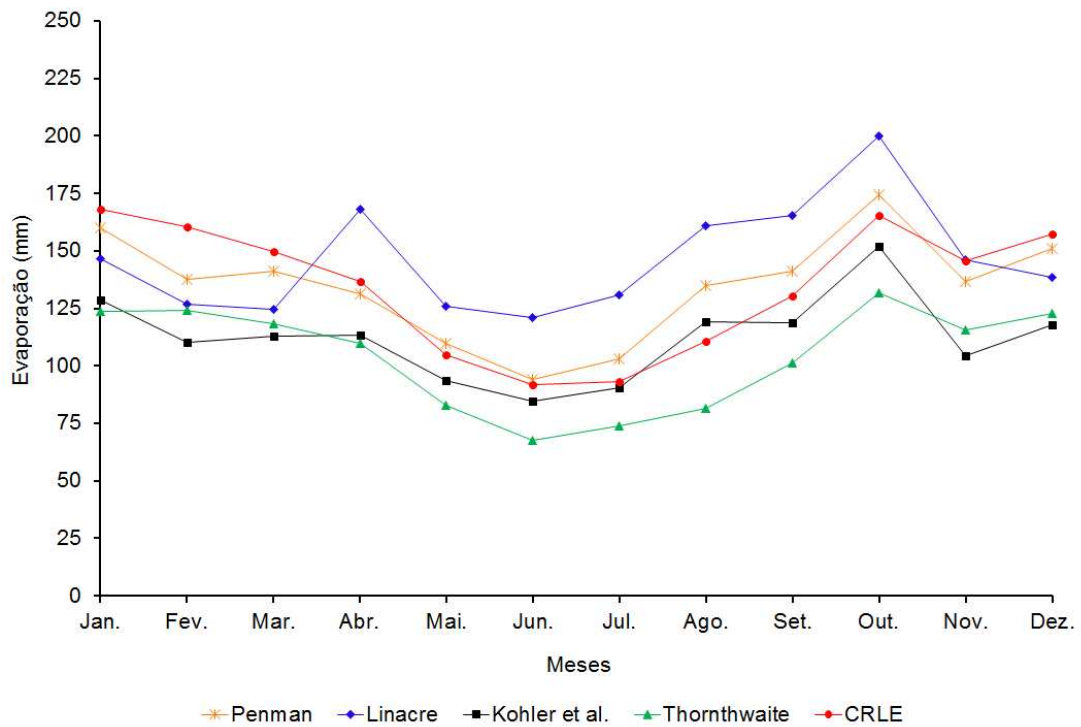


Figura 11 - Vazão evaporada ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) no reservatório de Três Marias – MG estimada pelos modelos Penman, Linacre, Kohler et al., Thornthwaite e CRLE, para os períodos de 2000, 2001 e 2002.

No mês de fevereiro os modelos Penman, CRLE e Thornthwaite, registraram o maior pico de vazão, atingindo valores de $45 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, $52 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e $40 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Já o modelo de Kohler et al. teve o pico de vazão em outubro, atingindo o valor da ordem de $38,4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

Em ambos os reservatórios, as vazões evaporadas ao longo do ano seguem o mesmo comportamento das lâminas evaporadas. Essa quantidade de água perdida diariamente com base no modelo de Penman, da ordem de $203 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e $39 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ para Sobradinho e Três Marias, respectivamente, é considerado pelo setor elétrico como perda de energia de acordo com Domingues (2006), já que deixa de passar pelas turbinas. A vazão evaporada em Sobradinho corresponde a 10% da vazão regularizada que passa na barragem. Já em Três Marias, a vazão evaporada corresponde a 7,6% da vazão regularizada.

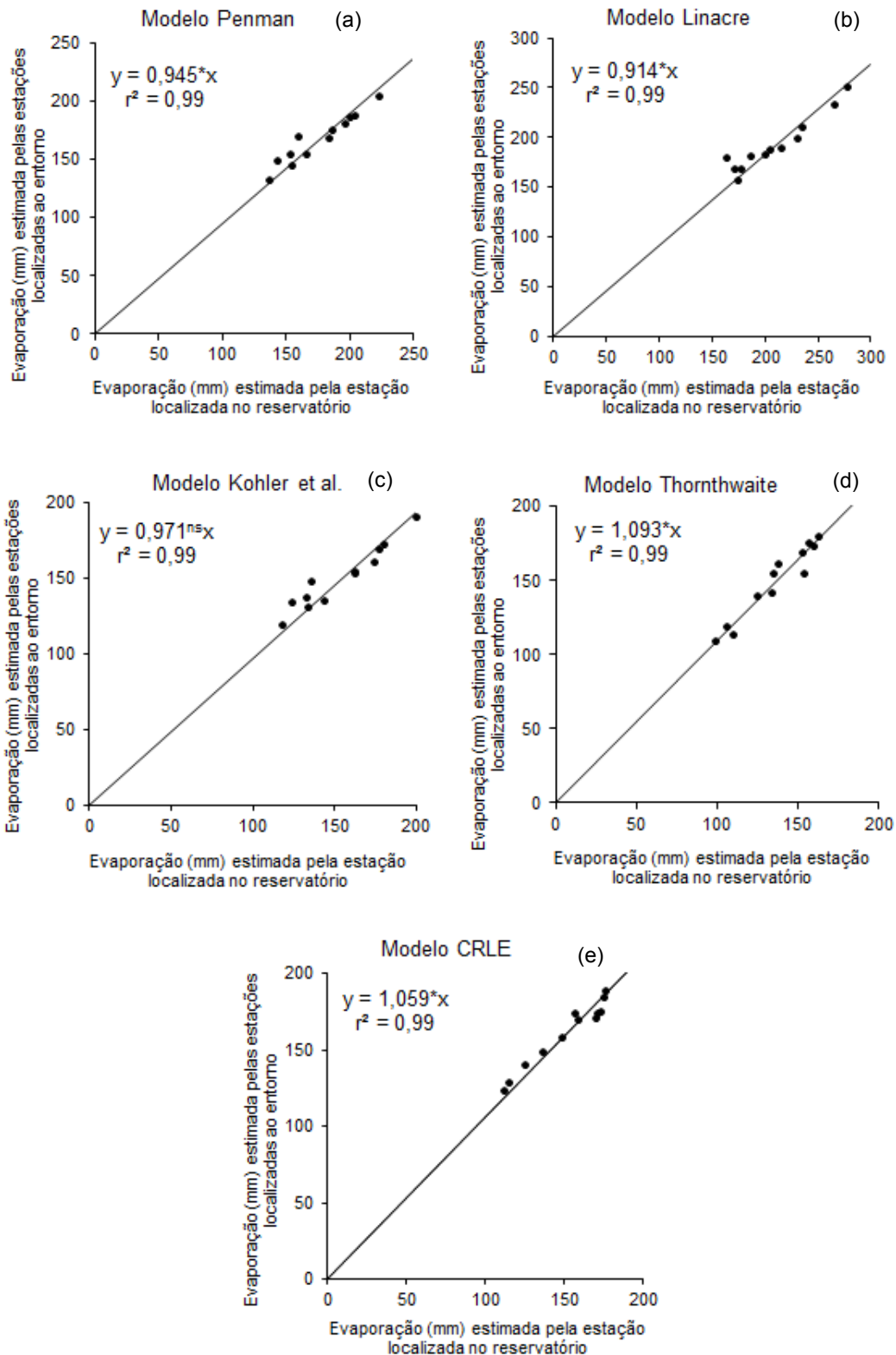
De maneira geral, o modelo Linacre superestima e Thornthwaite subestima os resultados em relação ao modelo de Penman no reservatório de Três Marias, da mesma forma que em Sobradinho.

4.5 Comparação entre as evaporações estimadas por diferentes estações meteorológicas

Na Figura 12 são apresentados os gráficos e a equação da reta 1:1 entre os resultados de evaporação estimados a partir da estação localizada no reservatório com a média dos resultados de duas estações que se localizam no entorno do reservatório de Sobradinho.

Em todos os modelos os coeficientes de determinação (r^2) foram altos, acima de 0,9, indicando que há linearidade entre as estimativas realizadas usando dados dos diferentes postos de coleta (Figura 12 a, b, c, d, e).

Analisando as equações encontradas para cada modelo (Figura 12), verifica-se que apenas o modelo Kohler et al. estima os mesmos valores de evaporação para a estação do reservatório e as vizinhas, pois o coeficiente angular não difere estatisticamente de um. Quando se utiliza os modelos de Penman e de Linacre as estações ao entorno do reservatório de Sobradinho subestimam a evaporação no reservatório em 6% e 9%, respectivamente. Ao utilizar os modelos CRLE e Thornthwaite, as estações no entorno superestimam a evaporação no reservatório em 6% e 9%. Provavelmente as estações ao entorno superestimaram a evaporação no reservatório quando se aplica os modelos CRLE e Thornthwaite, ao contrário do que ocorre com os modelos de Penman e Linacre, por: a) o modelo de Thornthwaite levar em consideração apenas dados de temperatura média do ar, tendo em vista que ela é maior nas cidades vizinhas do que no reservatório, chegando a atingir 30°C; b) como o modelo CRLE apresenta maior sensibilidade a temperatura e não leva em consideração a velocidade do vento, tais fatores podem ter contribuído para a superestimava da evaporação.



* a diferença nas evaporações estimadas é significativa pelo teste t a 5% de probabilidade,
^{ns} as evaporações não diferem significativamente pelo teste t a 5% de probabilidade.

Figura 12 – Comparação entre as evaporações estimadas pela estação localizada no reservatório de Sobradinho – BA com a média das estações localizadas ao entorno para os modelos: Penman (a), Linacre (b), Kohler et al. (c), Thornthwaite (d) e CRLE (e).

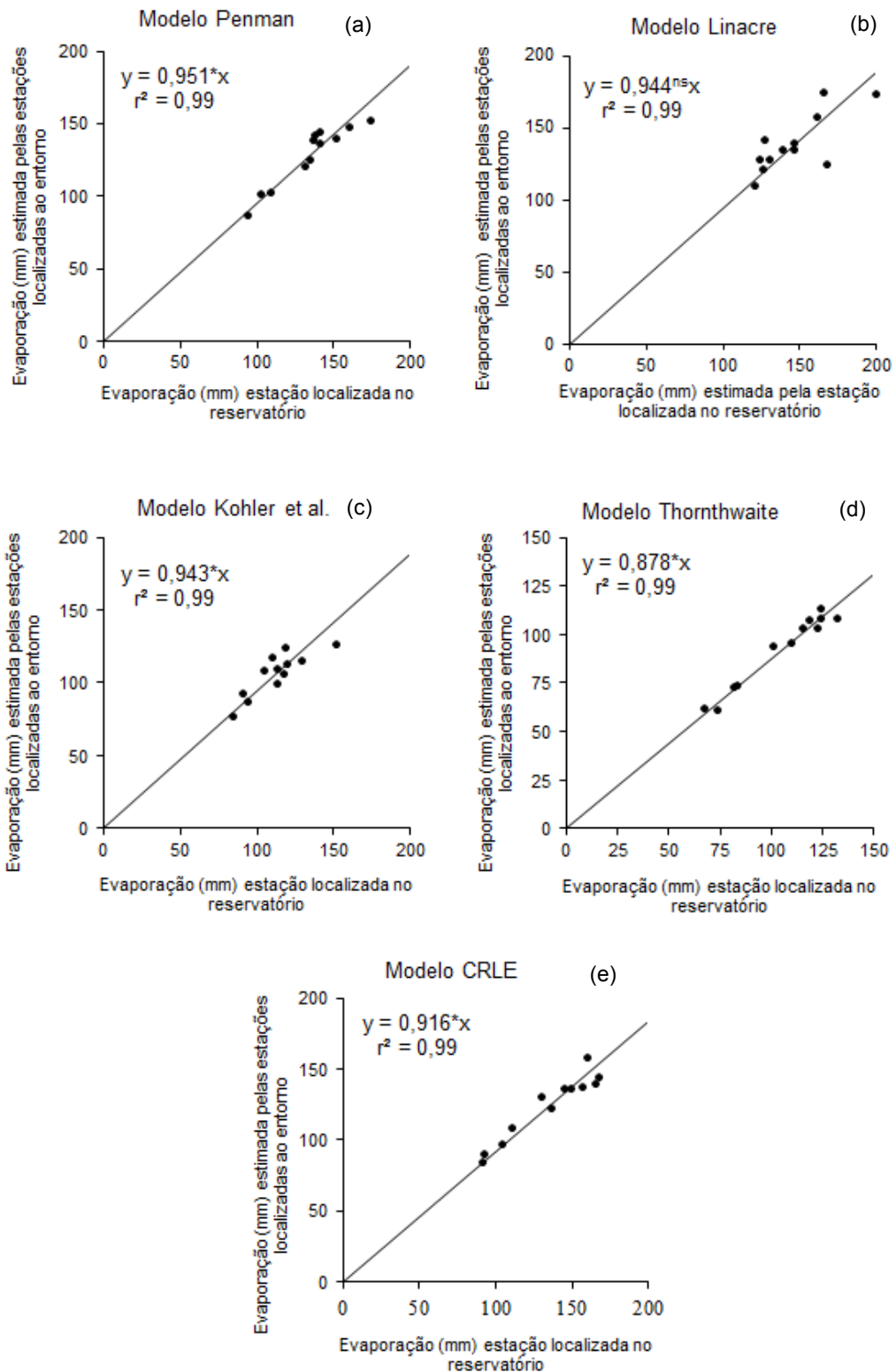
Na Figura 13 encontram-se dispostos os gráficos e a equação da reta 1:1 entre os resultados de evaporação estimados a partir da estação localizada no reservatório, com a média dos resultados de três estações que se localizam ao entorno do reservatório de Três Marias.

Em todos os modelos os coeficientes de determinação (r^2) foram altos (0,99), indicando que há linearidade entre as estimativas realizadas usando dados dos diferentes postos de coleta (Figura 13 a, b, c, d, e).

Do mesmo modo que para o reservatório de Sobradinho, o teste do parâmetro $\hat{\beta}_1$ da equação da reta $\hat{Y} = \hat{\beta}_1 X$ forneceu embasamento para verificar se as evaporações estimadas pela estação do reservatório de Três Marias e pelas estações vizinhas são estatisticamente iguais.

Através das equações encontradas por cada modelo, dispostas na Figura 13, verifica-se que apenas o modelo Linacre estima valores de evaporação não diferem estatisticamente para as estações do reservatório e as vizinhas. Quando se utiliza os demais modelos, as estações no entorno do reservatório geram subestimava da evaporação. Quantitativamente, os resultados são subestimados em 12%, 8%, 6% e 5% pelos modelos de Thornthwaite, CRLE, Kohler et al. e Penman, respectivamente.

De maneira geral, tanto no reservatório de Sobradinho como o de Três Marias, foram obtidas ótimas correlações entre as evaporações estimadas com os dados da estação no reservatório e no entorno. No entanto, as estimativas de evaporações não são estatisticamente iguais.



* a diferença nas evaporações estimadas é significativa pelo teste t a 5% de probabilidade,
^{ns} as evaporações não diferem significativamente pelo teste t a 5% de probabilidade.

Figura 13 - Comparação entre as evaporações estimadas pela estação localizada no reservatório de Três Marias – MG com a média das estações localizadas ao entorno para os modelos: Penman (a), Linacre (b), Kohler et al. (c), Thornthwaite (d) e CRLE (e).

Um estudo semelhante foi realizado por Dias e Kelman (1987) no reservatório de Sobradinho – BA, no período de 1979 a 1982, no qual compararam as estimativas mensais de evaporação através do modelo CRLE com base em dados de três postos de coleta localizados ao redor do reservatório. A partir dos resultados, os autores concluíram que o modelo CRLE apresentou resultados mais uniformes, e as diferenças na evaporação entre as estações variaram de 0,4% a 2,4%. Mas baseado no presente trabalho e, após a utilização de uma série histórica de dados meteorológicos mais extensa da região, fica claro que as diferenças entre as lâminas evaporadas pelos diferentes postos de coleta aumentaram.

5. CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos pode-se concluir que:

- A evaporação média anual no reservatório de Sobradinho estimada pelo modelo de Penman foi de 2.108 mm e no reservatório de Três Marias foi de 1.615 mm;
- O modelo Linacre superestima a lâmina evaporada no reservatório de Sobradinho e Três Marias em relação ao modelo de Penman;
- Os modelos Kohler et al. e Thornthwaite subestimam a lâmina evaporada no reservatório de Sobradinho e Três Marias em relação ao modelo de Penman;
- O modelo Complementary Relationship Lake Evaporation (CRLE) subestima a lâmina evaporada em relação a Penman para o reservatório de Sobradinho.
- Para o reservatório de Sobradinho o método do tanque Classe A ($K_p=0,6$), foi o que apresentou resultado mais próximo ao modelo de Penman.
- Os modelos CRLE e tanque Classe A utilizando $K_p=0,6$ estimam resultados que não diferem estatisticamente no reservatório de Sobradinho;
- Os modelos CRLE e Kohler et al. estimam lâminas evaporadas que não diferem estatisticamente no reservatório de Sobradinho;
- Para o reservatório de Três Marias, os modelos Penman e CRLE estimam lâminas evaporadas que não diferem estatisticamente;
- Os modelos Kohler et al. e Thornthwaite estimam lâminas evaporadas que não diferem estatisticamente no reservatório de Três Marias;
- A vazão média anual equivalente a lâmina evaporada no reservatório de Sobradinho para o modelo de Penman foi de $203 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e no reservatório de Três Marias foi de $39 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$;
- Todos os modelos apresentam sensibilidade à temperatura média do ar, sendo o modelo Thornthwaite o mais sensível;

- Os modelos mais sensíveis à insolação, nessa ordem são: CRLE, Kohler et al. e Penman;
- Os modelos mais sensíveis à velocidade do vento, nessa ordem são: Penman, Linacre e Kohler et al.;
- O único modelo que leva em consideração à precipitação é Linacre;
- A maioria dos modelos não estimam resultados de evaporação estatisticamente iguais, no reservatório de Sobradinho e Três Marias, quando se utiliza diferentes estações meteorológicas, com exceção do modelo Kohler et al. em Sobradinho, e do modelo Linacre em Três Marias.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R.G. **Ref-Et**. Reference evapotranspiration calculator, Version 2.1. Idaho: Idaho University, 82 p. 2000.

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. Grop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. **Irrigation and Drainage**. Paper No. 56, FAO, Italy, 1998. 328p.

ARANTES, E.P.; TROVATI, L.R. Análise e comparação da evaporação do Lago de Ilha Solteira pelo modelo de relação complementar com medidas do tanque Classe A. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 7., 2002, Foz do Iguaçu, PR. **Anais...** Rio de Janeiro: SBMET, 2002. p. 1670-1681.

BOUCHET, R.J. Evapotranspiration réelle et potentielle, signification climatque. **International Association of Scientific Hydrology**, n. 62, p. 134-142, 1963.

CEMIG - Companhia Energética do Estado de Minas Gerais; *Usinas da CEMIG, Informações Técnicas da Usina de Três Marias, 2014*. Disponível em: <http://www.cemig.com.br/pt-br/a_cemig/Nossa_Historia/Paginas/Usinas_Hidreletricas.aspx>. Acesso em: 20 de fev. de 2014.

CHESF - Companhia Hidroelétrica do São Francisco; **Fichas Técnicas das usinas da região Nordeste**. Disponível em: <http://www.chesf.gov.br/portal/page/portal/chesf_portal/paginas/sistema_chesf/sistema_chesf_geracao/container_geracao?p_name=8A2EEABD3C01D002E0430A803301D002>. Acesso em: 20 de fev. de 2014.

CAMARGO, A. P; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativas da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 5, n. 1, p. 89–97, 1997.

CHIN, D.A.; ZHAO, S. Evaluation of evaporation-pan networks. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 121, p. 338-346, 1995.

DAVENPORT, D.C.; HUDSON, J.P. Changes in evaporation rates along a 17-km transect in the Sudan Gezira. **Agricultural Meteorology**, v. 4, p. 339-352, 1967.

DIAS, N.L.C. **Estimativas climatológicas de evaporação em lagos**. 1986. 175 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 1986. citado por FONTES, A.S. **Estudo da evaporação em reservatórios situados em região semi-árida: uso de bacia experimental**. 2005. 210 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental e Urbana) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, 2005.

DIAS, N.L.C.; KELMAN, J. Comparações entre modelos climatológicos e o uso de tanque classe A para estimar a evaporação no reservatório de Sobradinho. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE HIDROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS, 7., 1987, Salvador, BA. **Anais...** São Paulo: ABRH, 1987. p. 162-169.

DOMINGUES, R.A. **Aspectos institucionais da gestão dos recursos hídricos: O caso do submédio São Francisco**. 2006. 191 f. Tese (Doutorado em Geografia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2006.

EVANGELISTA, A. W. P. **Metodologia para dimensionamento e manejo de sistemas de drenagem agrícola**. 2003. 102 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2003.

FONTES, A.S. **Estudo da evaporação em reservatórios situados em região semi-árida: uso de bacia experimental**. 2005. 210 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental e Urbana) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, 2005.

GANGOPADHYANA, M.; HARBECK, G.E.Jr.; NORDENSON, T.J.; OMAR, M.H.; URYVAEV, V.A. **Measurement and estimation of evaporation and evapotranspiration**. Geneva: World Meteorological Organization, 1966. 121 p. (Tech. Note N°83, WMO-N°201, TP 105).

KAN, A.; DIAS, N.L. Evaporação, evapotranspiração e evaporação líquida no reservatório de Foz do Areia. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 4, n. 3, p. 29-38, 1999.

KOHLER, M.A.; NORDENSEN, T.J.; FOX, W.E. Evaporation from pans and lakes, U.S. **Weather Bureau Research**, n. 38, p. 1-21, 1955. (Paper 38).

LEÃO, R.A.O.; SOARES, A.A.; TEIXEIRA, A.S.; SILVA, D.D. da. Estimativa da evaporação no açude Banabuiú, no Estado do Ceará, por diferentes métodos combinados, derivados da equação de Penman. **Engenharia Agrícola**, v. 33, n. 1, p. 129-144, 2013.

LEITÃO, M. de M.V.B.R.; OLIVEIRA, G.M de; LEITÃO, T.J.V. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evaporação para duas regiões da Paraíba, **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 6, p. 585–593, 2007.

LELIS, T.A.; CALIJURI, M.L.; SANTIAGO, A. da F.; LIMA, D.C. de; ROCHA, E. de O. Análise de sensibilidade e calibração do modelo SWAT aplicado em bacia hidrográfica da região sudoeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Porto Alegre, v. 36, p. 623-634, 2012.

LINACRE, E.T. A simple formula for estimating evaporation rates in various climates using temperature data alone. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 8, p. 409-424, 1977.

LINACRE, E.T. Data-sparse estimation of lake evaporation using a simplified Penman equation. Elsevier Science Publishers B.V. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 64, p. 237-256, 1993.

LOWE, L.D.; WEBB, J.A.; NATHAN, R.J.; ETCHELLS, T.; MALANO, H.M. Evaporation from water supply reservoirs: an assessment of uncertainty. **Journal of Hydrology**, v. 376, p. 261-274, 2009.

MORORÓ, A.P.P. **Modelo computacional para operação de reservatórios com múltiplos usos**. 2005. 210 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, 2005.

MORTON, F.I. Operational estimates of areal evaporation and their significance to the science and practice of hydrology. **Journal of hydrology**, v. 66, p. 1-76, 1983a.

MORTON, F.I. Operational estimates of lake evaporation. **Journal of hydrology**, v. 66, p. 77-100, 1983b.

OLIVEIRA, G.M. de; LEITÃO, M de M.V.B.R; GALVÃO, C. de O.; LEITÃO, T.J.V. Estimativa da evaporação e análise do uso do coeficiente (Kp) do tanque “Classe A” nas regiões do Cariri e Sertão da Paraíba. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n. 4, p. 73-83, 2005.

OLIVEIRA, G.X.S. **Relações entre medidas de evaporação de superfícies de água livre por evaporímetros e estimativas por métodos meteorológicos em duas regiões do Estado de São Paulo**. 2009. 102 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, 2009.

ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Evaporações líquidas nas usinas hidrelétricas**. Rio de Janeiro: Operador Nacional do Sistema Elétrico; Diretoria de planejamento programação da operação, 2004. 61 p.

PENMAN, H. L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. **Proceedings of the Royal Society**, v. 193, p. 120-145, 1948.

PEREIRA, A.R.; VILLA NOVA, N.A.; SEDIYAMA, G.C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183 p.

PEREIRA, A.R.; SEDIYAMA, G.C.; NOVA, N.A.V. **Evapotranspiração**. Campinas: FUNDAG, 2013. 323 p.

PEREIRA, S.B. **Evaporação no lago de Sobradinho e disponibilidade hídrica no rio São Francisco**. 2004. 105 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2004.

PEREIRA, S.B.; PRUSKI, F.F.; SILVA, D.D. da; RAMOS, M.M. Evaporação líquida no lago de Sobradinho e impactos no escoamento devido à

construção do reservatório. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 3, p. 346-352, 2009.

REIS, R.J.; DIAS, N.L. Multi-season lake evaporation: energy-budget estimates and CRLE model assessment with limited meteorological observations. **Journal of Hydrology**, v. 208, p. 135-147, 1998.

RIMMER, A.; SAMUELS, R.; LECHINSKY, Y. A comprehensive study across methods and time scales fluxes from Lake Kinneret, Israel. **Journal of Hydrology**, v. 379, p. 181-192, 2009.

RONG, Y.; SU, H.; ZHANG, R.; DUAN, Z. Effects of climate variability on evaporation in Dongping lake, China, during 2003–2010. **Hindawi Publishing Corporation**, v. 2013, p.1-11, 2013.

ROQUE, R.O.; SANSIGOLO, C.A. Estimativas de evaporação do lago Taquaruçu, SP pelo modelo conceitual de Morton. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 6, n. 1, p. 21-28, 2001.

ROSENBERRY, D. O.; WINTER, T. C.; BUSO, D. C.; LIKENS, G. E. Comparison of 15 evaporation methods applied to a small mountain lake in the northeastern USA. **Journal of Hydrology**, v. 340, p. 149-166, 2007.

SILVA, J.B.L da; FERREIRA, P.A.; RAMOS, M.M.; EUCLYDES, H.P.; SOARES, V.P. Modelos de previsão de enchentes em tempo real para o município de Nova Era – MG. **Recursos Hídricos e Ambientais**, p. 190-204, 2009.

SIMON, E.; MERO, F. A simplified cedure for the evaluation of the lake Kinneret evaporation. **Journal of Hydrology**, v. 78, p. 291-304, 1985.

SOBRINHO, J.E. **Análise dos termos “aerodinâmico” e “balanço de energia” da equação de Penman, para Viçosa, MG**. 1983. 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1983.

THORNTHWAITTE, C.W. An approach toward a rational classification of climate. **Geography Review**, v. 38, p. 55-94, 1948.

TOSTES, J.R.P. **Balanço hídrico regional, utilizando-se o modelo da relação complementar, em duas localidades de Minas Gerais**. 1993. 44 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1993.

TROVATI, L.R. Estimativas da evaporação do lago de Ilha Solteira através do modelo de relação complementar. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE HIDROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS, 7., 1987, Salvador, BA. **Anais...** São Paulo: ABRH, 1987. p. 193-202. *citado por* PEREIRA, S.B. **Evaporação no lago de Sobradinho e disponibilidade hídrica no rio São Francisco**.

2004. 105 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2004.

VALLET-COULOMB, C.; LEGESSE, D.; FRANÇOISE, G.; TRAVI, Y.; CHERNET, T. Lake evaporation estimates in tropical Africa (Lake Ziway, Ethiopia). **Journal of Hydrology**, v. 245, p. 1-18, 2001.

VARDAVAS, I.M.; FOUNTOULAKIS, A. Estimation of lake evaporation from standard meteorological measurements: application to four Australian Lakes in different climatic regions. **Ecological Modelling**, v. 84, p. 139-150, 1996.

VAREJÃO-SILVA, M.A. **Meteorologia e Climatologia**. Recife: 2006. 443 p. Versão Digital 2.

VOLPE, C.A.; OLIVEIRA, A.D. de. Relações entre a evaporação medida em diferentes evaporímetros. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 11, n. 2, p. 245-252, 2003.

SOLOMON, S. Relationship between precipitation, evaporation and runoff in tropical-equatorial regions. **Water Resources**, v. 3, p. 163-172, 1967.

APÊNDICES

APÊNDICE A

Tabela 1A – Áreas médias mensais (km²) do reservatório de Sobradinho no período de operação do reservatório de 1979 a 2013

Mês/Ano	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Média
1979	3737	3759	4514	4232	4166	4127	4072	3910	3683	3460	3350	3319	3861
1980	3328	3500	4438	4397	4020	3816	3726	3601	3471	3358	3304	3380	3695
1981	3311	3386	3593	4061	4091	3994	3845	3656	3484	3342	3375	3653	3649
1982	3487	3332	3510	3870	4054	3842	3838	3770	3634	3472	3252	3077	3595
1983	3156	3441	3772	4102	4128	4139	4109	3974	3780	3544	3563	3536	3770
1984	3544	3748	3765	4039	4135	3908	3634	3363	3112	2793	2503	2416	3413
1985	2761	3357	4005	4193	4206	4100	3911	3684	3431	3259	3165	3273	3612
1986	3483	3652	3938	4045	3911	3654	3412	3191	2920	2584	2289	2023	3259
1987	2062	2074	2170	2493	2625	2563	2495	2374	2168	1860	1551	1557	2166
1988	2326	2632	2899	2984	2907	2746	2563	2367	1974	1680	1683	1803	2380
1989	2297	2446	2589	2737	2582	2441	2348	2224	2046	1841	1773	2155	2290
1990	3268	4105	4231	4225	4119	3919	3738	3563	3324	3130	2974	2919	3626
1991	2904	3270	3608	4063	4199	4121	3845	3578	3364	3187	3038	3215	3533
1992	3473	3460	4109	4227	4218	4101	3940	3704	3481	3319	3345	3597	3748
1993	3567	4022	4176	4163	4005	3769	3510	3233	2932	2587	2358	2282	3384
1994	2686	3372	3735	4206	4156	3959	3569	3255	2913	2524	2187	2136	3225
1995	2429	2521	2672	2812	2820	2695	2541	2374	2132	1882	1742	1934	2380
1996	2462	2636	2584	2620	2610	2406	2229	2055	1883	1697	1589	1831	2217
1997	2298	3013	3273	3829	4192	4194	4092	3929	3712	3485	3361	3381	3563
1998	3619	3842	4097	4018	3650	3434	3256	3007	2673	2307	2073	2307	3190
1999	2599	2624	2715	2988	2760	2562	2360	2122	1841	1642	1499	1568	2273
2000	2042	2488	2921	3191	3124	2980	2782	2571	2345	2032	1784	2075	2528
2001	2513	2478	2374	2213	2025	1892	1797	1660	1538	1404	1328	1430	1888
2002	1852	2571	3041	3176	2949	2743	2531	2314	2002	1739	1563	1507	2332
2003	1777	2406	2568	2814	2681	2524	2399	2208	1987	1706	1532	1492	2174
2004	1645	2453	3328	4105	4205	4148	4011	3769	3468	3211	2971	2912	3352
2005	3144	3516	3850	4193	4181	4053	3788	3528	3264	2947	2619	2941	3502
2006	3495	3604	3651	4148	4176	4006	3698	3404	3071	2675	2583	2737	3437
2007	3214	3577	3892	4172	4030	3722	3389	3111	2752	2298	1736	1563	3121
2008	1784	2171	2673	3205	3383	3331	3200	2976	2619	2312	1883	1906	2620
2009	2425	3098	3507	3921	4205	4072	3769	3510	3316	3122	3114	3152	3434
2010	3346	3395	3353	3480	3422	3325	3208	2998	2731	2409	2256	2326	3021
2011	2580	2903	2992	3501	3741	3641	3507	3274	2998	2666	2416	2862	3090
2012	2974	3261	3656	3538	3283	3001	2809	2554	2298	2034	1973	2121	2792
2013	1987	2263	2399	2539	2705	2675	2601	2439	2286	2068	1893	1976	2319
Média	2788	3096	3389	3614	3590	3446	3272	3064	2818	2559	2389	2467	3041

Tabela 2A – Áreas médias mensais (km²) do reservatório de Três Marias no período de operação do reservatório de 1970 a 2011

Mês/Ano	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Média
1970	789	859	880	883	874	849	819	778	726	683	666	649	788
1971	610	553	518	504	492	473	465	451	440	454	489	632	507
1972	782	833	879	890	885	869	847	825	791	774	773	784	828
1973	799	840	874	889	892	883	868	841	799	760	733	713	824
1974	789	809	831	888	889	866	834	803	775	742	730	736	808
1975	822	847	858	856	844	820	793	764	735	698	702	745	790
1976	772	771	785	798	770	709	649	582	524	515	534	639	671
1977	768	848	861	888	885	860	827	801	772	719	667	682	798
1978	737	822	879	878	845	824	782	747	700	651	617	654	761
1979	721	873	876	896	896	889	872	849	819	778	738	717	827
1980	804	836	848	882	883	865	840	797	751	698	650	674	794
1981	709	753	774	816	804	787	761	728	697	677	720	751	748
1982	766	815	838	873	893	889	871	838	789	739	699	698	809
1983	785	863	864	875	814	804	778	746	717	707	697	706	780
1984	685	708	721	739	728	701	666	627	597	566	536	580	655
1985	681	805	848	879	889	881	862	834	799	766	734	723	808
1986	765	811	844	843	826	799	764	730	690	636	583	557	737
1987	615	646	631	644	636	607	567	521	472	430	402	430	550
1988	499	564	658	681	680	664	630	588	539	496	467	455	577
1989	497	524	568	583	563	538	509	478	452	429	422	464	502
1990	587	617	649	661	659	645	625	600	577	549	531	521	602
1991	576	749	853	894	892	886	867	839	803	778	755	743	803
1992	765	864	873	897	896	883	853	819	780	759	802	773	830
1993	749	783	844	880	885	874	855	828	797	760	724	710	807
1994	755	773	838	892	893	883	861	828	789	747	712	706	807
1995	717	753	815	847	843	820	781	737	688	647	636	626	743
1996	733	751	761	754	723	682	638	585	533	481	458	515	634
1997	710	793	863	894	887	877	845	794	732	672	617	662	779
1998	724	760	795	775	742	709	668	626	576	525	510	509	660
1999	537	657	762	811	786	745	695	638	581	536	511	535	650
2000	596	750	867	936	924	881	827	765	707	640	585	596	756
2001	640	640	627	614	583	559	535	510	484	463	444	462	547
2002	571	698	835	877	872	850	812	757	702	630	570	551	727
2003	618	724	752	769	753	724	687	644	599	546	501	508	652
2004	562	676	879	1003	1036	1037	1020	979	922	860	813	807	883
2005	921	969	1020	1041	1045	1033	1003	957	907	855	822	881	955
2006	906	918	980	1052	1053	1028	991	940	890	854	839	904	946
2007	958	1001	1029	1041	1035	1010	976	934	882	826	762	707	930
2008	673	809	947	1054	1075	1062	1035	995	943	879	821	818	926
2009	876	1017	1017	1082	881	851	824	778	729	839	819	824	878
2010	874	864	1008	1023	1081	1058	1019	969	903	692	694	743	911
2011	976	922	739	763	1007	978	937	886	826	839	799	840	876
Média	714	780	826	857	853	833	802	762	717	675	647	657	760

APÊNDICE B

Tabela 1B – Evaporação (mm) no reservatório de Sobradinho obtida pelos modelos Penman, Linacre, Kohler et al., Thornthwaite e CRLE e pelo tanque Classe A (ECA $k_p=0,4, 0,6$ e $0,8$).

Modelos	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Total
Penman													
1980	152,2	118,5	162,3	164,6	157,9	137,7	150,5	188,0	194,4	241,0	188,4	186,4	2041,9
1984	194,3	168,5	146,4	127,8	114,9	100,6	125,0	130,5	166,1	221,3	225,7	228,4	1949,7
1986	185,3	156,3	149,1	158,5	161,3	156,4	153,8	189,2	221,9	221,4	226,9	205,7	2185,9
1987	208,9	210,5	140,7	150,2	137,4	146,0	170,2	189,3	208,0	225,9	206,2	199,1	2192,3
1988	185,9	199,2	149,7	139,1	141,0	122,0	149,4	183,8	214,2	209,3	206,2	156,1	2056,1
1989	181,1	147,4	166,8	159,9	134,4	151,7	140,9	184,0	195,1	229,7	178,9	124,9	1994,9
1990	185,9	148,6	173,7	153,4	153,1	137,0	141,4	-	219,0	211,5	188,6	211,7	-
1991	167,6	170,2	163,3	157,3	145,2	129,0	149,0	166,2	166,7	218,3	164,9	178,1	1975,8
1994	219,3	166,9	151,3	170,6	183,2	163,0	184,5	225,0	273,5	256,3	225,2	235,3	2454,3
1996	223,1	203,7	166,6	158,6	161,9	152,2	175,0	206,9	236,1	258,1	201,3	218,0	2361,5
1997	168,4	188,4	144,9	144,9	126,4	131,3	169,8	202,1	208,5	224,7	205,5	225,9	2140,7
1998	186,2	175,4	231,2	232,7	220,6	178,8	205,3	236,2	250,6	272,3	-	203,2	-
2003	-	190,3	193,4	165,6	146,3	170,4	182,4	220,1	246,4	269,9	243,4	250,0	-
2004	150,7	146,7	145,8	147,9	140,0	148,0	171,4	198,3	228,2	241,9	224,1	221,4	2164,5
2005	193,9	165,1	158,7	147,6	145,1	156,3	188,8	216,2	231,3	247,3	221,9	197,3	2269,7
2006	252,7	172,7	150,7	-	130,1	125,7	165,2	181,4	196,7	197,5	178,3	206,5	-
2007	200,0	159,1	160,7	152,5	147,0	144,9	148,4	187,8	203,2	235,9	218,3	203,9	2161,7
2008	190,7	167,8	146,4	131,1	129,9	115,3	139,9	153,7	168,9	211,4	193,4	188,2	1936,6
2009	176,1	152,0	153,1	128,7	114,2	111,6	128,1	143,4	147,6	165,3	176,1	163,5	1759,6
2010	168,1	149,7	159,1	142,5	129,0	126,3	132,6	177,0	190,4	188,9	178,5	151,4	1893,5
2011	153,9	140,5	138,8	136,8	110,2	107,5	112,8	137,9	167,4	188,8	190,7	188,8	1774,0
2012	174,8	168,7	167,8	141,6	128,4	104,9	111,4	137,0	152,5	175,9	154,1	171,8	1789,0
Média	186,6	166,6	160,0	152,9	143,5	137,1	154,4	183,5	203,9	223,3	199,8	196,2	2108,0
Linacre													
1980	144,6	108,0	189,6	174,8	189,9	168,1	180,5	227,3	242,8	311,0	263,1	220,6	2420,3
1984	236,0	245,4	145,9	136,1	172,0	162,4	190,6	191,3	224,7	273,8	228,8	259,4	2466,4
1986	244,1	142,8	133,3	172,7	192,8	199,0	205,2	239,1	285,2	267,5	265,0	218,7	2565,5
1987	234,6	239,4	116,0	170,8	173,9	190,3	214,7	239,4	266,3	285,8	231,5	218,2	2580,9
1988	180,1	213,4	143,4	123,3	183,2	139,3	189,6	224,4	275,6	242,5	213,6	148,7	2277,0
1989	205,1	205,7	155,6	213,0	170,0	163,5	192,3	226,5	247,1	294,1	189,4	94,9	2357,5
1990	243,8	127,3	207,9	194,8	199,6	176,2	153,4	-	279,3	270,4	232,1	224,6	-
1991	188,0	151,8	137,6	163,3	166,3	171,4	196,0	222,7	239,1	287,3	180,4	214,0	2317,7
1994	201,8	178,7	150,8	231,2	232,7	214,0	232,1	275,9	344,8	325,0	270,3	240,5	2897,8
1996	287,2	217,2	154,9	173,5	206,9	187,6	218,2	255,4	291,4	329,1	189,7	236,4	2747,5
1997	178,7	184,4	137,1	129,0	177,8	171,3	217,8	250,9	261,7	231,7	211,9	248,5	2400,7
1998	157,6	214,0	245,1	282,2	263,6	225,2	252,4	292,4	312,1	335,5	-	220,5	-
2003	-	255,1	178,2	188,0	208,8	215,1	217,2	282,5	316,0	349,9	278,8	283,2	-
2004	111,3	136,3	161,3	188,8	170,5	190,5	221,0	249,8	289,9	311,5	216,7	287,1	2534,8
2005	190,6	158,5	154,2	183,6	173,7	200,1	244,0	280,3	301,5	323,9	243,6	266,1	2720,2
2006	327,8	151,8	161,6	-	180,6	171,4	221,6	235,2	249,8	213,1	175,1	231,6	-
2007	230,5	130,2	210,0	156,1	192,5	186,7	187,4	240,6	266,6	298,4	267,5	192,1	2558,7
2008	239,9	169,6	135,7	120,1	180,6	160,7	187,7	204,6	229,5	272,4	248,1	170,6	2319,4
2009	147,7	126,6	143,1	104,1	164,3	152,8	170,0	189,2	200,2	153,6	224,9	182,9	1959,5
2010	205,9	166,9	182,1	144,6	176,7	150,3	181,6	227,5	249,5	229,1	240,9	150,9	2306,0
2011	167,8	139,9	131,0	144,9	143,7	154,6	162,7	188,4	224,4	226,9	240,2	187,6	2112,3
2012	174,7	169,6	215,4	203,0	195,1	162,0	172,4	209,8	244,6	285,3	231,7	259,8	2523,3
Média	204,7	174,2	163,2	171,3	187,1	177,9	200,4	235,9	265,6	278,1	230,6	216,2	2505,0

Continua...

Tabela 1B – Cont.

Modelos	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Total
Kohler et al.													
1980	123,4	89,0	141,3	145,4	138,8	119,9	134,5	165,6	168,8	207,4	163,2	162,5	1759,9
1984	168,4	136,8	115,5	101,4	89,3	74,4	95,8	103,4	135,3	193,5	203,5	212,8	1630,2
1986	162,4	134,9	123,2	140,0	144,7	139,0	133,8	170,0	199,8	198,6	202,1	181,8	1930,2
1987	188,4	190,9	111,9	131,4	115,9	128,1	155,2	171,4	187,8	206,0	184,1	175,3	1946,5
1988	160,2	179,7	124,7	120,6	125,3	102,3	128,3	163,6	189,4	181,2	178,9	128,4	1782,7
1989	155,4	119,8	143,0	138,6	110,4	131,8	119,9	163,4	173,8	206,4	153,0	94,3	1710,0
1990	165,1	127,6	156,5	132,1	138,0	119,1	125,3	-	191,7	189,0	161,0	191,6	-
1991	142,3	154,7	141,0	140,3	124,0	109,6	129,9	140,4	136,9	192,5	139,4	160,3	1711,1
1994	186,4	139,3	123,3	142,5	156,3	133,2	155,3	196,6	228,5	218,8	195,4	202,4	2078,0
1996	193,5	180,2	140,3	132,6	139,4	130,5	152,1	181,3	206,1	231,6	168,0	193,3	2049,0
1997	138,0	162,7	113,8	124,0	100,3	115,3	145,1	176,6	187,0	194,7	181,5	198,2	1837,2
1998	155,8	149,0	201,0	202,7	192,7	153,2	177,5	203,8	216,8	238,4	-	171,8	-
2003	-	165,0	164,6	147,4	122,6	150,1	156,6	190,6	214,5	233,0	208,6	222,2	-
2004	120,6	123,9	122,8	130,3	123,0	127,5	147,1	172,6	198,2	212,5	197,6	198,9	1875,0
2005	166,7	143,6	134,4	124,3	120,5	132,7	160,3	186,0	204,8	222,0	196,1	171,8	1963,2
2006	225,9	146,5	123,5	-	107,9	101,4	143,8	157,4	169,8	170,7	155,4	187,2	-
2007	179,7	136,5	136,3	132,7	128,6	130,9	131,4	164,1	177,2	208,6	195,0	185,7	1906,5
2008	177,7	145,9	123,9	116,1	114,4	103,3	125,7	138,7	151,0	194,1	183,3	168,3	1742,4
2009	154,5	132,0	131,2	105,7	91,2	95,4	113,9	131,2	138,9	156,8	171,4	148,2	1570,5
2010	154,9	134,4	144,4	123,5	117,0	113,7	111,1	155,2	170,3	173,2	170,0	130,8	1698,6
2011	136,5	125,8	118,0	126,1	94,7	96,8	101,3	131,5	155,3	168,9	166,3	171,5	1592,7
2012	160,0	149,4	158,2	138,5	131,9	99,4	104,8	141,7	162,7	196,4	154,4	179,3	1776,7
Média	162,7	144,0	136,0	133,1	124,0	118,5	134,0	162,2	180,2	199,7	177,5	174,4	1846,4
Thorntwaite													
1980	107,1	104,4	113,5	136,8	132,5	109,8	117,3	155,1	240,6	259,5	279,6	291,1	2047,3
1984	182,4	204,7	163,0	131,0	120,5	102,2	98,2	117,7	128,0	157,3	172,5	207,5	1785,1
1986	141,8	138,8	121,8	141,8	127,2	100,7	95,3	120,0	145,9	189,1	174,5	196,7	1693,6
1987	170,1	204,6	125,3	127,2	119,7	110,8	111,7	118,8	142,2	171,3	183,6	182,3	1767,5
1988	164,7	192,3	122,3	103,2	119,8	96,0	93,9	96,7	114,9	141,9	163,6	124,0	1533,2
1989	146,3	161,9	143,3	146,3	129,9	117,5	94,5	113,3	143,3	164,1	157,6	101,3	1619,1
1990	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1991	151,5	162,7	151,5	136,2	121,2	92,1	82,2	94,2	119,6	141,8	150,5	140,9	1544,3
1994	169,8	150,1	131,2	144,0	137,0	107,5	95,7	106,7	126,6	158,7	154,3	187,6	1669,2
1996	164,1	184,8	157,6	150,3	138,3	100,2	97,9	113,0	134,4	141,2	119,8	135,4	1636,9
1997	139,3	142,9	121,8	123,5	98,0	106,0	96,5	101,6	142,9	144,8	127,7	149,6	1494,6
1998	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2003	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2004	121,9	120,3	115,6	128,4	106,5	97,3	87,4	99,4	107,3	147,7	148,6	150,5	1430,9
2005	165,3	128,9	132,3	131,5	108,8	99,3	95,8	95,8	118,1	136,7	134,9	120,5	1467,9
2006	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2007	168,8	143,7	133,7	139,6	133,7	117,0	113,5	108,5	126,1	162,0	199,6	156,4	1702,6
2008	148,6	154,4	117,0	110,7	99,5	85,3	81,5	103,9	114,6	149,6	170,7	167,6	1503,3
2009	165,3	147,9	165,3	152,4	145,7	137,2	136,1	136,1	152,4	157,0	168,9	166,5	1830,7
2010	164,2	159,7	176,8	166,4	161,9	140,9	124,7	114,2	123,8	139,0	109,9	88,5	1670,1
2011	122,8	131,8	131,8	130,2	108,2	92,8	76,1	94,1	102,4	122,8	155,2	159,9	1428,1
2012	165,9	134,3	151,5	133,4	132,5	101,2	85,8	91,2	126,3	136,1	151,5	142,7	1552,3
Média	153,3	153,8	137,5	135,2	124,5	106,3	99,1	110,0	133,8	156,7	162,4	159,4	1632,0

Continua...

Tabela 1B – Cont.

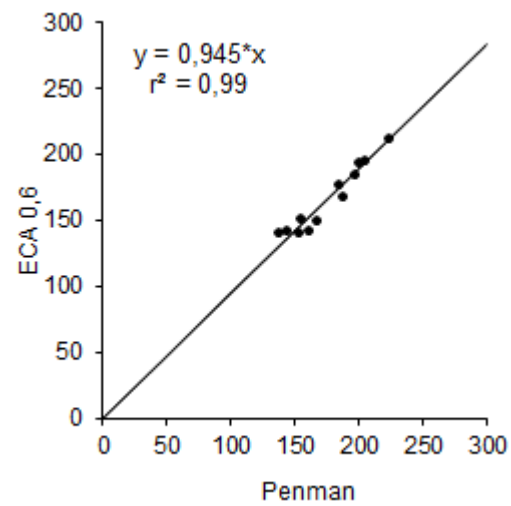
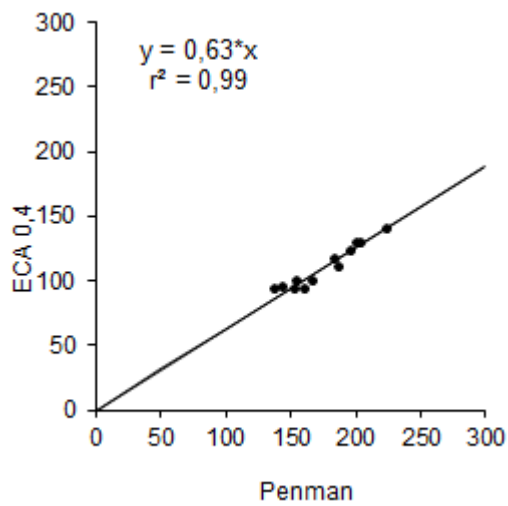
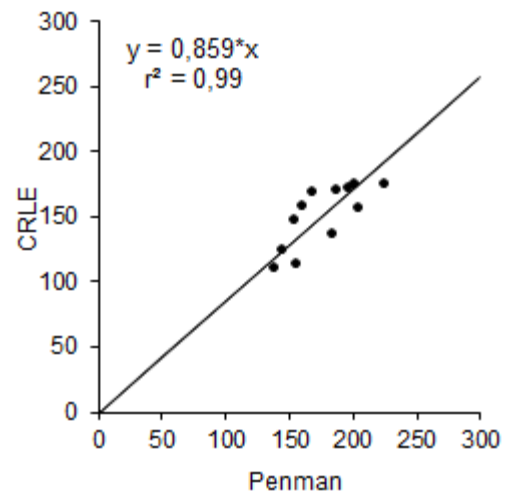
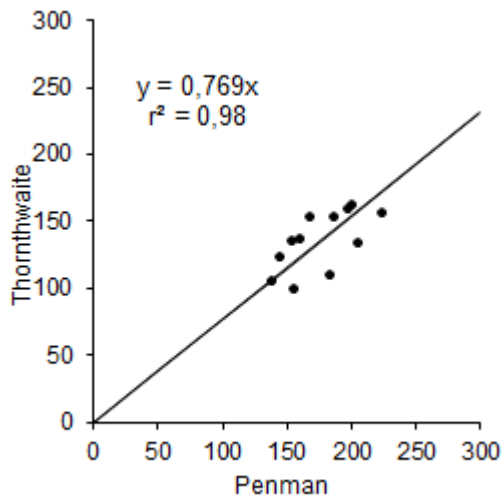
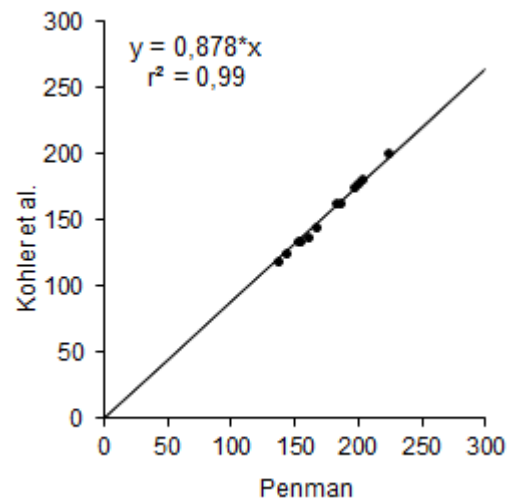
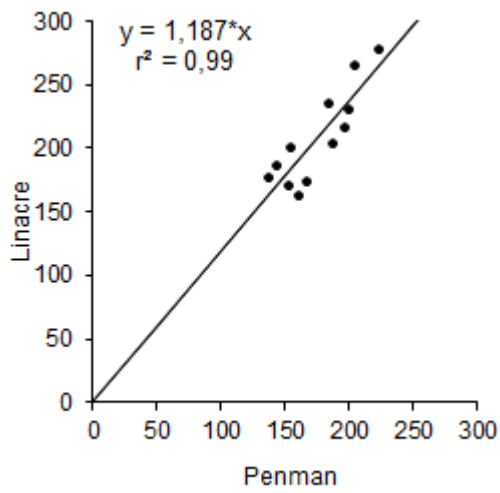
Modelos	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Total
CRLE													
1980	159,9	142,3	175,1	168,1	147,0	129,1	138,9	157,3	184,0	189,7	184,6	187,4	1963,4
1984	178,8	151,6	140,1	129,0	100,3	81,7	83,5	110,1	137,3	173,8	190,3	203,4	1679,9
1986	170,3	168,0	150,4	152,5	135,3	120,0	112,5	145,1	167,7	180,6	183,3	177,8	1863,5
1987	187,4	195,8	136,8	149,3	117,0	118,5	130,4	146,6	167,9	187,8	183,4	177,6	1898,5
1988	170,8	189,9	151,8	141,4	133,6	106,7	111,7	143,8	157,2	165,7	170,6	148,4	1791,5
1989	163,5	137,7	160,2	150,0	115,0	117,2	108,0	140,4	166,6	183,7	161,5	125,7	1729,4
1990	176,4	167,9	177,1	144,6	138,0	119,6	122,0	-	161,6	179,4	160,3	187,9	-
1991	161,2	190,5	163,2	157,8	122,7	109,0	111,8	121,4	126,6	170,5	153,8	168,4	1756,7
1994	177,4	159,4	149,7	139,6	130,5	101,2	113,8	143,3	151,2	172,7	178,2	181,9	1798,9
1996	180,5	189,7	162,0	145,7	131,3	117,4	121,6	143,3	166,8	182,0	151,1	176,8	1868,1
1997	148,4	175,1	179,1	148,3	130,7	124,2	120,2	146,8	161,8	169,7	202,8	161,1	1868,2
1998	164,5	177,1	187,2	167,8	147,4	115,0	125,6	142,5	161,8	187,8	-	163,5	-
2003	-	172,5	159,3	146,5	104,0	117,5	112,6	133,8	155,6	171,4	171,0	184,5	-
2004	137,3	159,1	146,9	144,1	124,7	106,9	111,4	134,7	153,0	174,1	178,6	180,9	1751,7
2005	170,7	164,5	152,0	136,6	113,1	106,5	109,7	127,5	156,8	175,6	173,7	159,3	1746,1
2006	183,5	161,9	147,7	-	113,0	92,6	107,5	131,0	149,8	162,5	169,4	190,4	-
2007	178,7	170,8	150,7	146,8	132,4	123,0	123,4	136,1	153,4	183,8	190,7	184,2	1874,1
2008	182,9	175,0	145,5	148,0	118,3	106,0	112,4	127,5	148,1	182,2	193,5	185,3	1830,7
2009	175,5	179,9	164,3	144,0	117,9	119,0	126,3	143,4	161,5	176,9	195,1	171,0	1874,8
2010	180,0	169,4	173,1	156,3	134,5	123,7	112,6	137,3	157,4	171,2	172,5	140,0	1827,8
2011	162,9	165,1	154,7	151,4	110,6	104,1	102,9	132,3	152,3	161,0	166,5	181,9	1745,6
2012	180,2	181,6	173,6	149,7	131,0	105,2	103,8	130,2	152,9	174,4	156,3	170,3	1809,2
Média	171,0	170,2	159,1	148,5	124,9	112,0	114,7	136,9	156,9	176,2	175,6	173,1	1819,0
ECA $k_p=0,4$													
1980	92,5	61,5	90,1	117,5	125,2	118,8	123,6	153,1	149,6	210,2	134,4	142,4	1519,0
1984	155,0	167,2	132,2	87,4	99,6	100,8	129,5	145,3	146,2	172,6	166,4	163,8	1665,9
1986	126,6	101,4	96,6	112,8	113,7	118,6	119,0	145,1	149,0	130,9	138,2	124,6	1476,6
1987	133,1	152,2	67,3	88,0	72,2	94,3	113,2	128,8	133,3	154,6	160,0	148,3	1445,3
1988	108,7	125,3	114,7	97,1	85,1	71,8	102,7	128,3	134,5	136,5	119,2	92,3	1316,1
1989	138,4	112,6	107,4	97,6	132,2	87,6	92,6	116,4	125,6	147,6	149,6	137,0	1444,6
1990	111,2	85,5	109,1	100,8	112,1	101,0	79,1	-	125,5	128,0	183,5	132,8	-
1991	90,8	105,3	102,5	100,2	98,0	98,9	104,8	115,8	195,1	193,7	118,2	129,0	1452,2
1994	95,5	84,0	70,7	93,6	105,0	84,0	86,8	111,8	119,8	123,8	131,6	123,6	1230,2
1996	105,3	112,3	79,5	92,8	99,2	96,5	97,5	109,1	130,8	136,4	102,4	107,8	1269,4
1997	88,2	91,8	68,8	71,0	66,1	80,6	97,0	109,7	121,2	116,1	119,3	127,7	1157,6
1998	94,6	103,5	131,8	119,8	114,2	111,0	114,1	123,0	138,4	151,3	-	112,2	-
2003	98,6	106,5	116,7	100,8	95,0	116,2	96,0	119,2	120,4	141,5	130,4	139,6	1380,8
2004	94,5	67,6	80,1	96,1	87,8	94,7	122,9	113,3	128,5	141,7	122,4	134,7	1284,3
2005	107,8	90,0	89,8	91,6	87,3	89,3	98,6	108,3	133,4	144,3	132,1	116,1	1288,5
2006	143,1	99,8	75,9	-	79,2	78,5	90,8	106,4	111,7	127,3	98,0	122,3	-
2007	136,4	72,8	88,0	94,0	89,9	96,6	103,4	115,3	124,7	140,4	126,6	121,5	1309,6
2008	115,3	100,2	84,6	64,8	91,9	89,4	94,0	106,6	112,3	132,4	125,3	100,9	1217,8
2009	104,0	70,6	66,7	56,4	57,7	63,8	92,4	100,4	104,0	114,1	118,4	92,0	1040,6
2010	103,7	94,1	108,6	74,4	99,3	89,9	83,9	109,2	116,9	115,1	125,8	103,2	1224,0
2011	100,8	97,3	70,6	92,0	76,9	87,8	96,0	108,0	124,9	120,0	107,5	110,1	1192,0
2012	112,2	89,4	125,1	115,1	100,7	93,5	82,8	98,8	113,5	125,2	103,0	125,5	1284,9
Média	111,6	99,6	94,4	93,5	94,9	93,8	100,9	117,7	130,0	141,1	129,2	123,1	1329,8

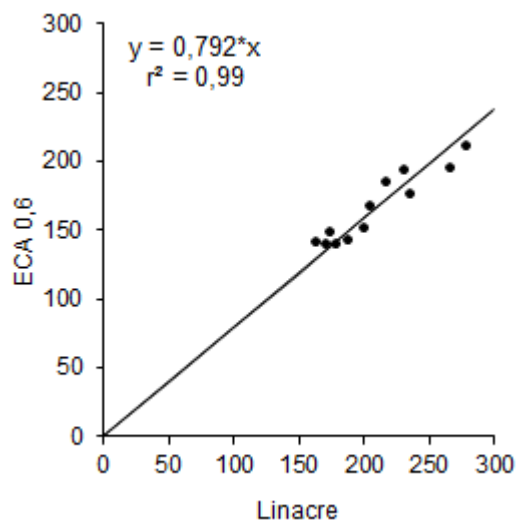
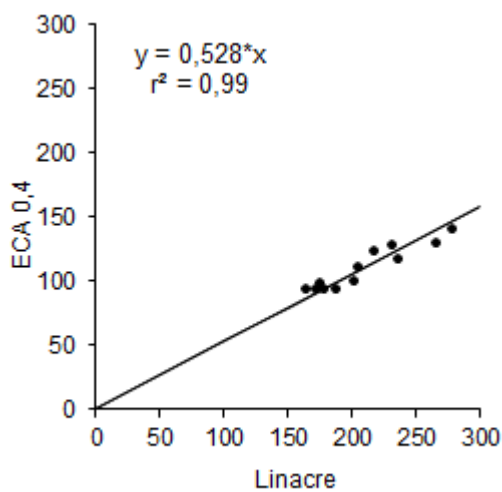
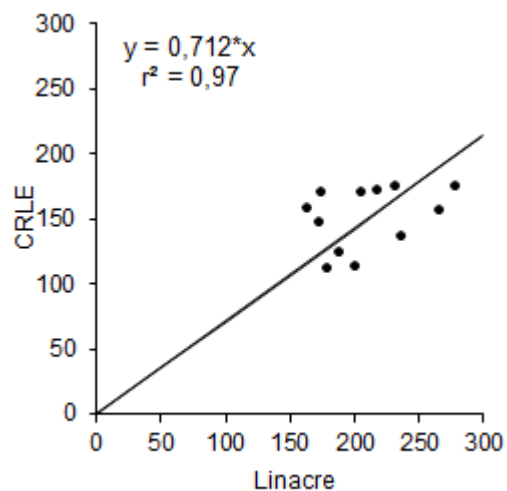
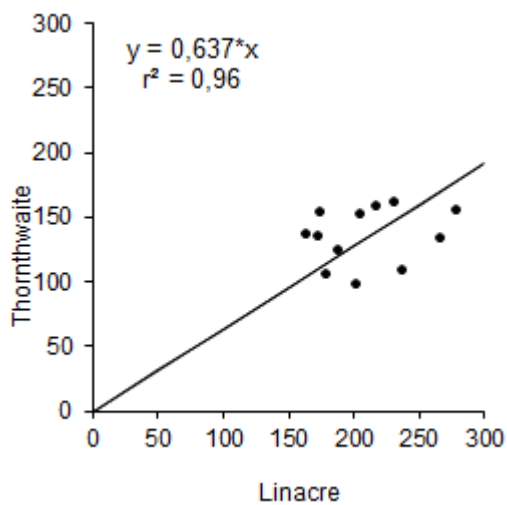
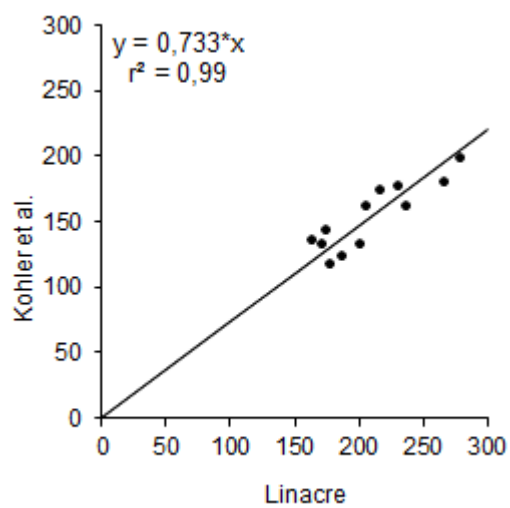
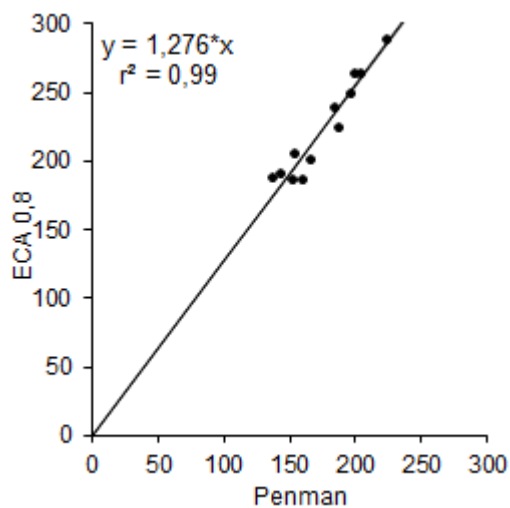
Continua...

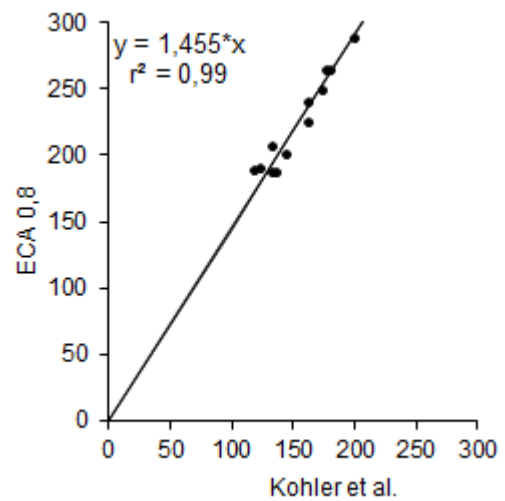
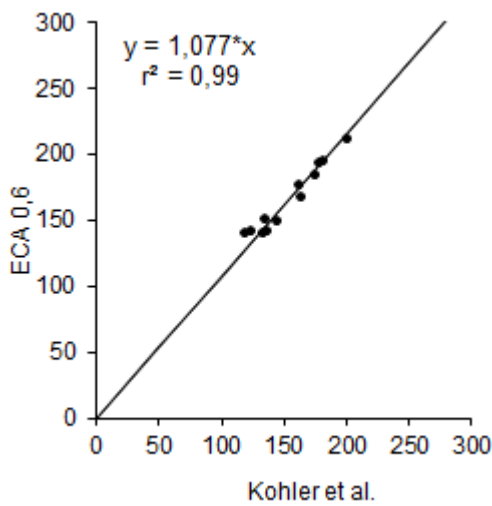
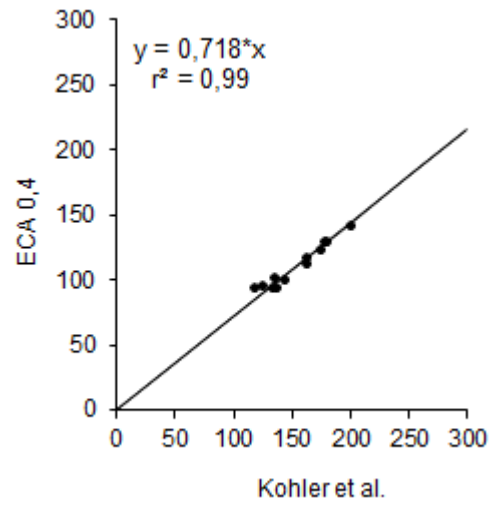
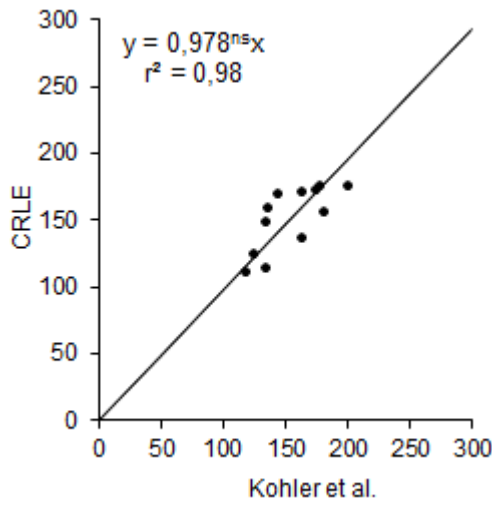
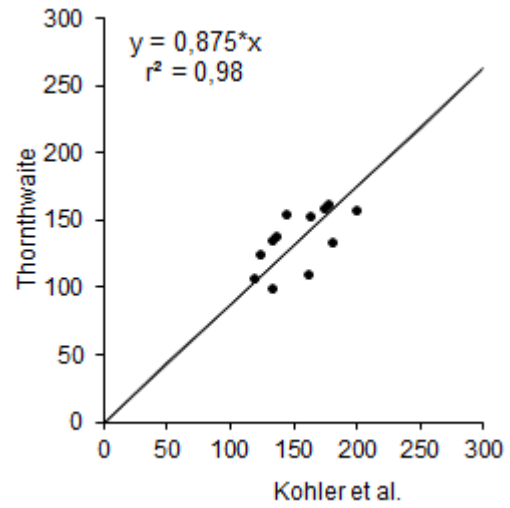
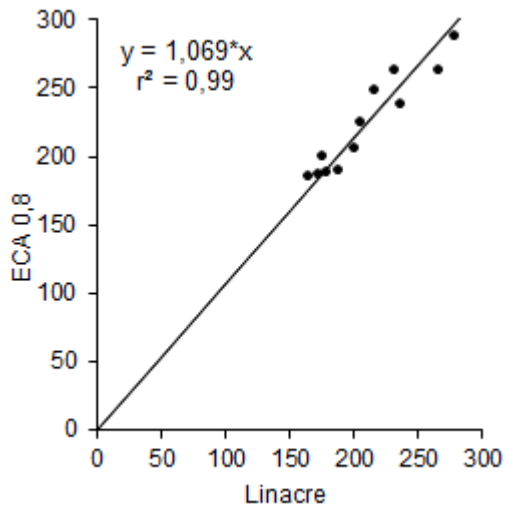
Tabela 1B – Cont.

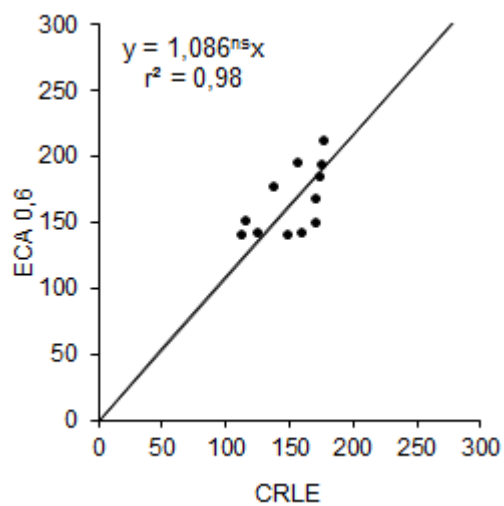
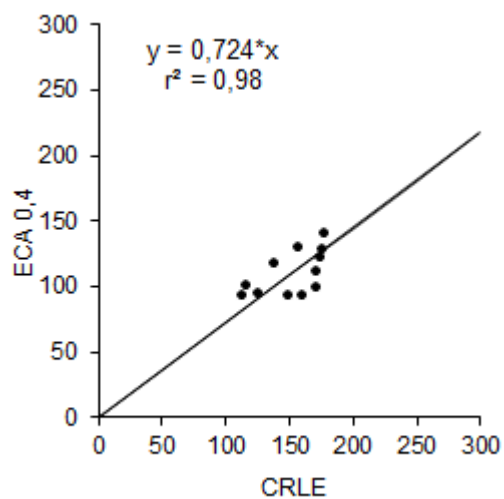
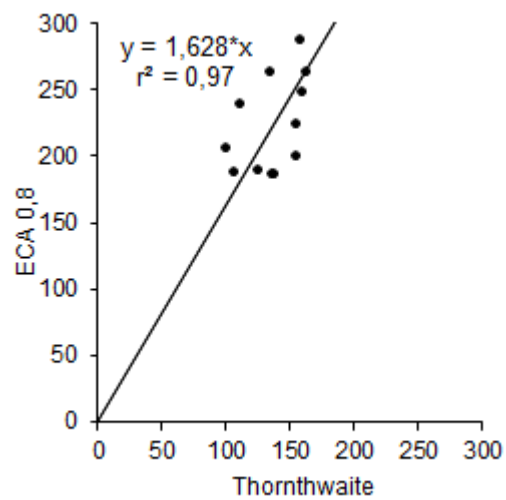
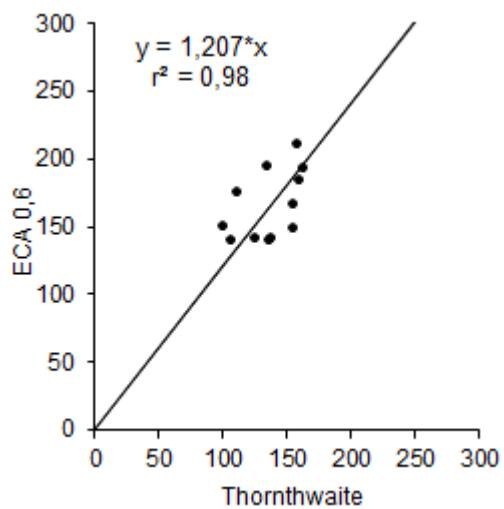
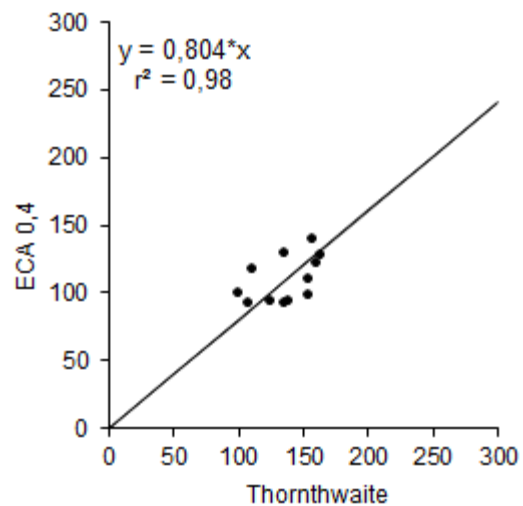
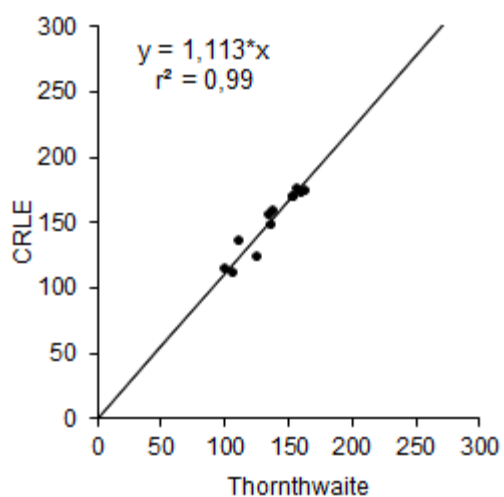
Modelos	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Total
ECA $k_p=0,6$													
1980	138,8	92,2	135,2	176,2	187,9	178,2	185,4	229,7	224,5	315,3	201,6	213,5	2278,5
1984	232,5	250,7	198,3	131,0	149,4	151,2	194,2	218,0	219,2	258,9	249,7	245,7	2498,8
1986	189,9	152,0	144,9	169,2	170,6	177,8	178,6	217,6	223,6	196,4	207,4	186,9	2214,9
1987	199,6	228,3	101,0	131,9	108,3	141,5	169,8	193,3	200,0	231,9	239,9	222,5	2168,0
1988	163,1	187,9	172,1	145,6	127,6	107,6	154,0	192,5	201,8	204,8	178,7	138,4	1974,2
1989	207,6	168,8	161,1	146,3	198,3	131,4	138,9	174,7	188,5	221,3	224,5	205,5	2166,9
1990	166,8	128,2	163,7	151,2	168,1	151,6	118,7	-	188,3	192,0	275,2	199,2	-
1991	136,2	157,9	153,8	150,3	146,9	148,3	157,2	173,7	292,7	290,5	177,3	193,4	2178,3
1994	143,2	126,0	106,0	140,4	157,5	126,0	130,2	167,8	179,6	185,6	197,5	185,4	1845,3
1996	157,9	168,4	119,2	139,1	148,8	144,7	146,2	163,7	196,2	204,6	153,5	161,6	1904,1
1997	132,2	137,8	103,2	106,6	99,1	121,0	145,5	164,6	181,8	174,1	178,9	191,6	1736,4
1998	141,9	155,2	197,7	179,6	171,3	166,5	171,1	184,5	207,5	226,9	-	168,3	-
2003	147,9	159,8	175,0	151,2	142,5	174,2	144,0	178,7	180,5	212,2	195,7	209,4	2071,2
2004	141,7	101,4	120,2	144,2	131,7	142,0	184,3	170,0	192,8	212,6	183,6	202,0	1926,5
2005	161,6	135,1	134,7	137,3	130,9	133,9	147,9	162,4	200,2	216,5	198,2	174,1	1932,8
2006	214,6	149,7	113,8	-	118,9	117,7	136,2	159,6	167,6	191,0	147,1	183,4	-
2007	204,6	109,2	132,1	140,9	134,9	144,9	155,1	173,0	187,0	210,6	189,9	182,3	1964,4
2008	173,0	150,3	126,9	97,2	137,8	134,1	141,0	160,0	168,5	198,6	187,9	151,4	1826,7
2009	156,1	105,8	100,1	84,6	86,5	95,8	138,6	150,7	156,1	171,1	177,7	138,0	1560,9
2010	155,5	141,1	162,9	111,6	149,0	134,8	125,9	163,9	175,3	172,6	188,6	154,8	1836,1
2011	151,2	146,0	105,8	138,1	115,3	131,8	144,0	162,0	187,4	180,0	161,3	165,2	1788,0
2012	168,3	134,2	187,7	172,6	151,0	140,2	124,2	148,2	170,3	187,9	154,4	188,2	1927,3
Média	167,5	149,4	141,6	140,3	142,4	140,7	151,4	176,6	195,0	211,6	193,7	184,6	1994,7
ECA $k_p=0,8$													
1980	185,0	123,0	180,3	235,0	250,5	237,6	247,3	306,3	299,3	420,4	268,8	284,7	3038,0
1984	310,0	334,3	264,4	174,7	199,1	201,6	258,9	290,7	292,3	345,2	332,9	327,6	3331,7
1986	253,2	202,7	193,2	225,6	227,4	237,1	238,1	290,2	298,1	261,9	276,5	249,2	2953,2
1987	266,1	304,4	134,7	175,9	144,3	188,6	226,4	257,7	266,6	309,3	319,9	296,6	2890,6
1988	217,5	250,6	229,4	194,2	170,1	143,5	205,3	256,7	269,0	273,0	238,3	184,5	2632,2
1989	276,8	225,1	214,8	195,1	264,4	175,2	185,3	232,9	251,3	295,1	299,3	274,0	2889,2
1990	222,5	170,9	218,2	201,6	224,2	202,1	158,2	-	251,0	255,9	367,0	265,6	-
1991	181,5	210,6	205,1	200,4	195,9	197,8	209,6	231,6	390,2	387,4	236,4	257,9	2904,4
1994	191,0	168,0	141,4	187,2	210,1	168,0	173,6	223,7	239,5	247,5	263,3	247,3	2460,4
1996	210,6	224,6	159,0	185,5	198,4	193,0	194,9	218,2	261,6	272,8	204,7	215,5	2538,8
1997	176,3	183,7	137,6	142,1	132,2	161,3	193,9	219,5	242,4	232,1	238,6	255,4	2315,1
1998	189,2	207,0	263,6	239,5	228,4	222,0	228,2	246,0	276,7	302,6	-	224,4	-
2003	197,2	213,0	233,4	201,6	190,0	232,3	192,0	238,3	240,7	283,0	260,9	279,2	2761,5
2004	189,0	135,3	160,2	192,2	175,6	189,4	245,8	226,7	257,0	283,5	244,8	269,3	2568,7
2005	215,5	180,1	179,6	183,1	174,6	178,6	197,2	216,5	266,9	288,7	264,2	232,1	2577,0
2006	286,2	199,6	151,8	-	158,5	157,0	181,5	212,8	223,4	254,7	196,1	244,5	-
2007	272,8	145,6	176,1	187,9	179,8	193,2	206,8	230,6	249,4	280,7	253,2	243,0	2619,2
2008	230,6	200,4	169,1	129,6	183,8	178,8	188,0	213,3	224,6	264,9	250,6	201,9	2435,6
2009	208,1	141,1	133,4	112,8	115,3	127,7	184,8	200,9	208,1	228,2	236,9	184,0	2081,2
2010	207,3	188,2	217,2	148,8	198,6	179,8	167,9	218,5	233,8	230,1	251,5	206,3	2448,1
2011	201,6	194,7	141,1	184,1	153,8	175,7	192,0	216,0	249,8	240,1	215,0	220,2	2384,0
2012	224,4	178,9	250,2	230,2	201,4	187,0	165,7	197,7	227,0	250,5	205,9	251,0	2569,8
Média	225,2	201,0	186,6	186,9	190,7	188,7	206,1	239,6	263,6	288,8	264,0	249,3	2690,4

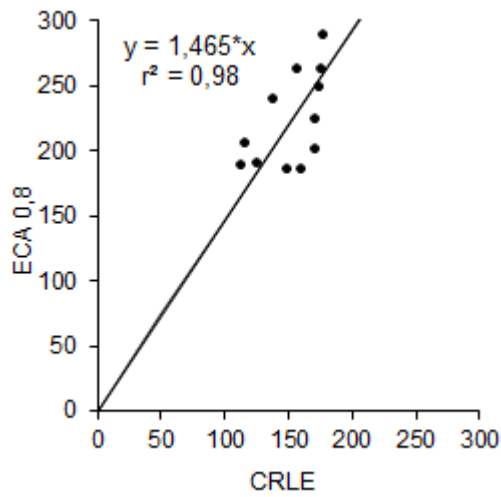
APÊNDICE C











* a diferença nas evaporações estimadas é significativa pelo teste t a 5% de probabilidade, ^{ns} as evaporações não diferem significativamente pelo teste t a 5% de probabilidade.

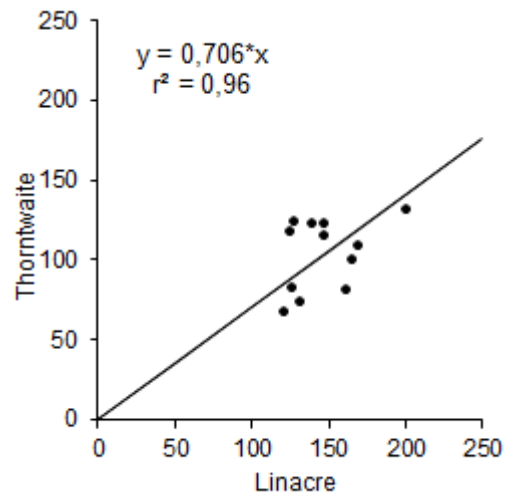
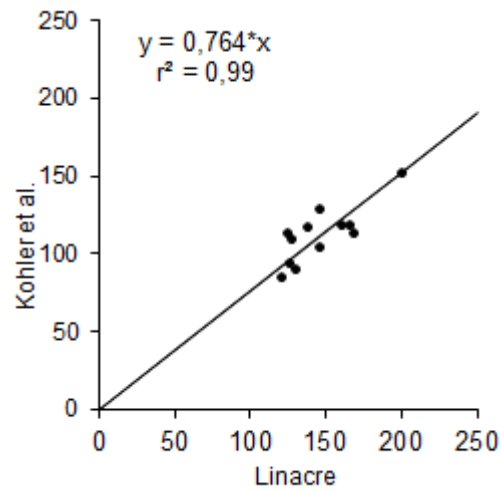
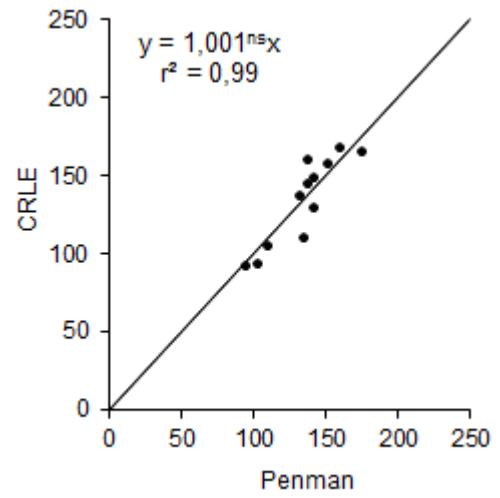
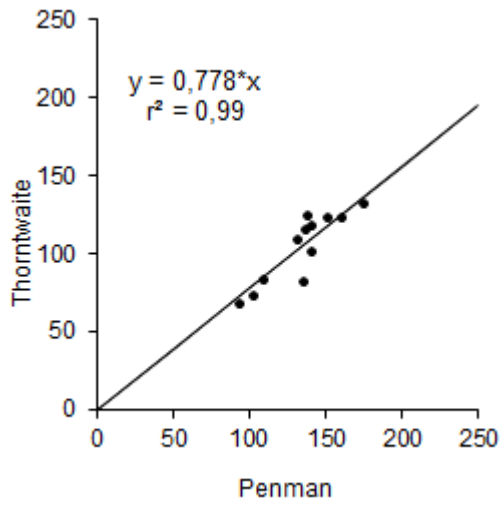
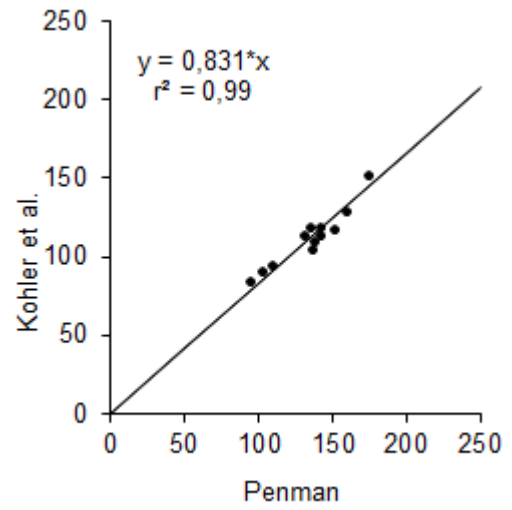
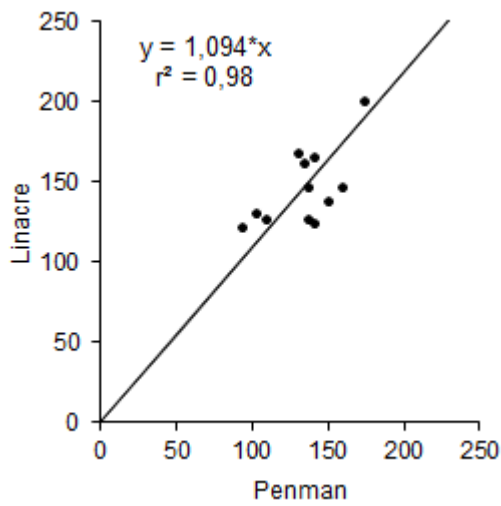
Figura C1 – Comparação entre as evaporações estimadas com os modelos Penman, Linacre, Kohler et al., Thornthwaite e CRLE e o método do tanque Classe A com os coeficientes 0,4, 0,6 e 0,8, para o reservatório de Sobradinho – BA.

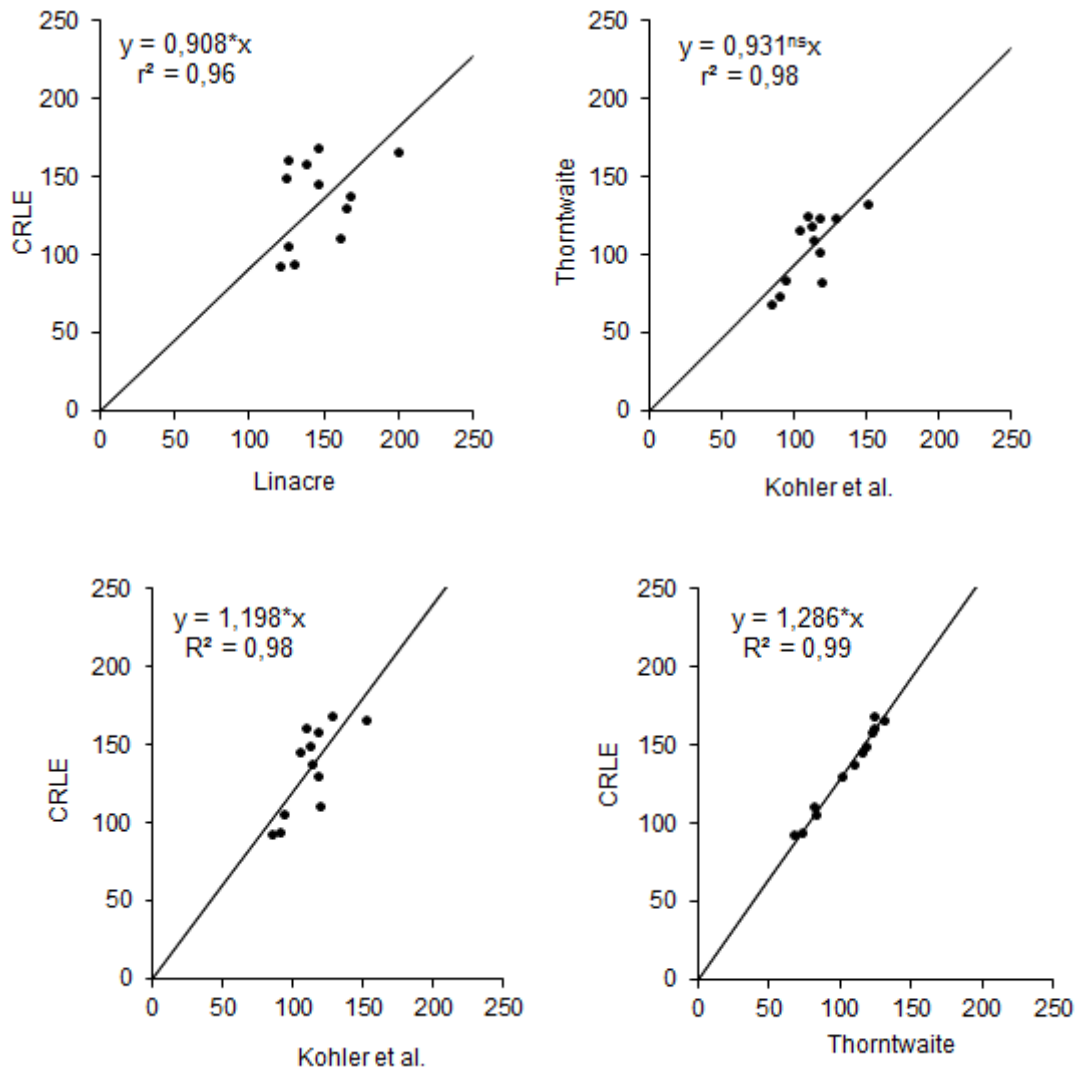
APÊNDICE D

Tabela 1D – Evaporação (mm) no reservatório de Três Marias obtida pelos modelos Penman, Linacre, Kohler et al., Thornthwaite e CRLE.

Modelos	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Total
Penman													
2000	156,0	132,1	127,4	125,8	110,7	92,5	104,3	128,9	140,1	187,6	124,9	157,3	1587,5
2001	167,7	166,9	145,9	134,2	105,9	98,4	101,4	141,5	145,9	150,6	132,2	143,9	1634,5
2002	156,2	113,6	150,0	134,5	112,0	90,9	103,1	134,7	137,1	184,5	153,4	152,3	1622,2
Média	160,0	137,5	141,1	131,5	109,5	93,9	103,0	135,0	141,0	174,2	136,8	151,2	1614,7
Linacre													
2000	136,8	125,5	101,9	166,7	140,6	119,1	138,2	150,9	157,0	201,8	137,2	148,1	1723,8
2001	158,6	153,4	131,0	167,7	110,1	125,0	131,4	160,5	190,7	185,5	152,8	136,9	1803,5
2002	144,0	101,7	140,1	169,9	127,5	119,1	122,4	172,0	148,3	212,1	148,2	130,1	1735,5
Média	146,5	126,9	124,4	168,1	126,1	121,1	130,6	161,1	165,4	199,8	146,1	138,4	1754,3
Kohler et al.													
2000	124,4	103,7	97,2	107,5	97,1	83,7	91,1	111,6	117,8	167,2	92,0	124,3	1317,7
2001	138,5	144,5	118,8	117,7	89,1	89,4	91,7	124,7	123,8	121,8	98,6	110,4	1368,8
2002	123,3	81,7	122,6	115,4	95,3	80,5	88,9	121,2	113,9	166,2	123,0	118,4	1350,5
Média	128,7	110,0	112,9	113,5	93,8	84,5	90,6	119,2	118,5	151,7	104,5	117,7	1345,7
Thornthwaite													
2000	120,1	120,4	111,7	98,0	74,6	62,3	68,2	73,9	96,7	143,6	106,2	122,9	1198,7
2001	122,7	145,5	121,9	118,5	84,6	70,6	74,6	79,5	107,0	110,4	117,6	114,5	1267,2
2002	128,6	106,3	121,1	112,4	89,9	70,1	78,3	91,5	99,7	141,2	122,9	130,8	1292,8
Média	123,8	124,1	118,3	109,6	83,0	67,7	73,7	81,6	101,1	131,7	115,6	122,7	1252,9
CRLE													
2000	163,7	155,9	135,8	129,5	106,0	91,4	89,0	103,9	128,1	175,2	132,0	164,4	1574,8
2001	174,2	191,8	154,9	141,0	100,5	93,6	96,6	108,8	131,8	143,8	142,0	146,6	1625,6
2002	166,1	133,4	157,7	139,5	107,4	90,8	93,6	118,9	130,7	177,3	162,3	160,6	1638,3
Média	168,0	160,4	149,5	136,6	104,6	91,9	93,0	110,5	130,2	165,4	145,4	157,2	1612,9

APÊNDICE E





* a diferença nas evaporações estimadas é significativa pelo teste t a 5% de probabilidade, ^{ns} as evaporações não diferem significativamente pelo teste t a 5% de probabilidade.

Figura E1 – Comparação entre as evaporações estimadas com os modelos Linacre, Kohler et al., Thornthwaite, CRLE e Penman, para o reservatório de Três Marias – MG.