

SILVIO BUENO PEREIRA

**EVAPORAÇÃO NO LAGO DE SOBRADINHO E
DISPONIBILIDADE HÍDRICA NO RIO SÃO FRANCISCO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de “Doctor Scientiae”.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL

2004

SILVIO BUENO PEREIRA

**EVAPORAÇÃO NO LAGO DE SOBRADINHO E
DISPONIBILIDADE HÍDRICA NO RIO SÃO FRANCISCO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de “Doctor Scientiae”.

APROVADA: 31 de agosto de 2004.

Prof. Daniel Fonseca de Carvalho

Dr. José Márcio Alves da Silva

Prof. Demetrius David da Silva
(Conselheiro)

Prof. Márcio Mota Ramos
(Conselheiro)

Prof. Fernando Falco Pruski
(Orientador)

*“Louvado sejas tu, meu Senhor,
por nossa irmã, a água,
que é útil e humilde, preciosa e casta . . .”*

S. Francisco de Assis

A Deus
À minha esposa Sonia
Aos meus pais Adonias e Leonilda

AGRADECIMENTO

A Deus, pelo dom da vida sempre revestido de amor, graça e fidelidade.

À minha esposa Sonia, pela alegria do encontro, pelo amor cheio de compreensão e dependência de Quem nos uniu e pela certeza da nossa cumplicidade não somente nesses anos, mas em todos que pudermos viver.

Aos meus pais Adonias e Leonilda, fonte de força e carinho, por, mesmo de longe, terem-me acompanhado – por isso estiveram sempre tão perto! São exemplos de vida, coragem e fé.

Aos meus irmãos, pelas diversas situações em que não faltou o diálogo, que fortalece nossos laços familiares.

Aos meus sogros Péricles e Alva, pelo cuidado e ajuda contínuos que me fazem sentir acolhido e amado.

Ao Pastor Almir e família, instrumentos de Deus na minha caminhada acadêmica, por ter-me ensinado a perseverar nos desafios.

Aos meus amigos da Aliança Bíblica Universitária – Grupo Pós-Graduação, pela amizade, pelo companheirismo e pelas orações.

À Universidade Federal de Viçosa (UFV), por intermédio do Departamento de Engenharia Agrícola, pelos ensinamentos e pela oportunidade de realização do Curso.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudo e pelo apoio financeiro do projeto.

Ao Professor Fernando Falco Pruski, pela orientação, pelo incentivo e pela relação de confiança e amizade.

Aos Professores Demetrius David da Silva, Márcio Mota Ramos e Gilberto Chohaku Sedyama, pelos aconselhamentos e pelas sugestões oportunas.

Aos meus amigos Luciano, Ricardo, Flávio, Renata, Alessandro, Luiz, José Márcio, Nori, Roberto e demais integrantes do GPRH, pelas valiosas ajudas e pela convivência durante a realização deste trabalho.

A Paulo Trajano, Sheila e José Rosa e Silva, funcionários da Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF), pelo fornecimento de dados necessários à realização desta tese.

Aos funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola, em especial a Marcos, José Galinari e Juvercino.

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

BIOGRAFIA

SILVIO BUENO PEREIRA, filho de Adonias Alves Pereira e Leonilda Bueno Pereira, nasceu em 9 de junho de 1973, em Guaíba, PR.

Em agosto de 1992, iniciou o Curso de Graduação em Engenharia Agrônômica na Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, em Seropédica, RJ, concluindo-o em agosto de 1997.

Em agosto de 1997, iniciou o Curso de Mestrado em Engenharia Agrícola, área de Irrigação e Drenagem, na Universidade Federal de Viçosa, em Viçosa, MG, concluindo-o em outubro de 1999.

Em agosto de 2000, iniciou o Curso de Doutorado em Engenharia Agrícola, na área de Recursos Hídricos e Ambientais, na UFV, submetendo-se à defesa de tese em agosto de 2004.

ÍNDICE

	Página
LISTA DE SÍMBOLOS.....	ix
RESUMO.....	xiv
ABSTRACT.....	xvii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1. A bacia do rio São Francisco.....	3
2.2. Gestão de recursos hídricos e desenvolvimento sustentável.....	9
2.3. Evaporação em reservatórios.....	13
2.3.1. Tanque Classe A.....	14
2.3.2. Modelo Morton.....	15
2.3.3. Modelo Linacre.....	20
2.3.4. Modelo Kohler et al.....	21
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	23
3.1. Análise do comportamento hidrológico na bacia do São Francisco.....	23
3.1.1. Preenchimento de falhas e extensão de séries.....	25
3.1.2. Precipitação média anual.....	27

	Página
3.1.3. Vazões médias e mínimas.....	28
3.1.4. Coeficiente de deságüe.....	31
3.1.5. Análise de estacionariedade.....	31
3.2. Procedimento de ajuste das vazões médias e mínimas ao longo do rio São Francisco.....	32
3.3. Estimativa da evaporação líquida no lago de Sobradinho.....	34
3.3.1. Estimativa da evaporação no lago de Sobradinho.....	35
3.3.1.1. Tanque Classe A.....	35
3.3.1.2. Modelo CRLE.....	35
3.3.1.3. Modelo Linacre.....	43
3.3.1.4. Modelo Kohler et al.....	44
3.3.2. Estimativa da evapotranspiração real na área do reservatório de Sobradinho antes da sua construção.....	45
3.3.3. Análise de sensibilidade.....	46
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	47
4.1. Comportamento das variáveis hidrológicas no rio São Francisco e seus principais afluentes.....	47
4.1.1. Precipitação média anual.....	47
4.1.2. Vazões médias anuais.....	52
4.2. Procedimento de ajuste das vazões médias e mínimas ao longo do rio São Francisco.....	61
4.2.1. Vazão média anual ao longo do rio São Francisco.....	61
4.2.2. Vazão mínima ao longo do rio São Francisco.....	64
4.3. Estimativa da evaporação líquida no lago de Sobradinho com o uso do método do tanque Classe A e dos modelos Linacre, Kohler et al. e CRLE.....	66
4.3.1. Evaporação no lago de Sobradinho.....	66
4.3.2. Evaporação líquida no lago de Sobradinho.....	71
5. CONCLUSÕES.....	75
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	77
APÊNDICES.....	83

LISTA DE SÍMBOLOS

- E_{TR} = evapotranspiração real ou regional, mm mês⁻¹.
- E_{TP} = evapotranspiração potencial, mm mês⁻¹.
- E_{TW} = evapotranspiração de equilíbrio, mm mês⁻¹.
- E_L = evaporação no lago, mm mês⁻¹.
- T = temperatura média do ar, °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 dia⁻¹.
- ε = constante de emissividade igual a 0,92.
- σ = constante de Stefan-Boltzmann igual a $4,903 \cdot 10^{-9}$ MJ K⁴m⁻² dia⁻¹.
- T_a = temperatura média do ar, K.
- Δ = declividade da curva de pressão de vapor, kPa °C⁻¹.
- γ = constante psicrométrica igual a $0,665 \cdot 10^{-3}$ kPa °C⁻¹.
- $f(u)$ = coeficiente de transporte de vapor d'água.
- E_a = poder evaporante do ar, mm dia⁻¹.
- U = velocidade do vento a 2 m de altura, km dia⁻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.
- Q_y = vazão do posto com falha, $m^3 s^{-1}$.
- Q_x = vazão do posto com dados, $m^3 s^{-1}$.
- a, b = parâmetros ajustados na regressão pelo método dos mínimos quadrados, adimensional.
- P_y = precipitação do posto com falha, mm.
- P_x = precipitação do posto com dados, mm.
- r_{yxj} = coeficiente de correlação entre os postos considerados, adimensional.
- z = número total de postos vizinhos considerados.
- P_m = precipitação média na bacia considerada, mm.
- P_i = valor da isoieteta de ordem i, mm.
- P_{i+1} = valor da isoieteta de ordem i + 1, mm.
- A_i = área interna à bacia entre as duas isoietetas de ordem i e i+1, km^2 .
- A = área total da bacia, km^2 .
- P_j = precipitação em cada estação, mm.
- A_j = área de influência de P_j , km^2 .
- n = número de estações pluviométricas consideradas.
- Q_r = vazão de referência em um ponto da bacia, $m^3 s^{-1}$.
- Q_{rp} = vazão de referência em um posto fluviométrico próximo, $m^3 s^{-1}$.
- A_x = área de drenagem da seção de vazão conhecida, km^2 .
- A_y = área de drenagem da seção de interesse, a jusante da seção de vazão conhecida, km^2 .
- C_p = contribuição potencial, %.
- $V_{pAfluyente}$ = volume precipitado na área de drenagem do afluente estudado, m^3 .
- V_{pbacia} = volume precipitado na área de drenagem da bacia, m^3 .
- C_r = contribuição real, %.

- $V_{e_{\text{Afluente}}}$ = volume médio escoado na seção de deságüe do afluente no São Francisco, m^3 .
- $V_{e_{\text{bacia}}}$ = volume médio na foz da bacia do São Francisco, m^3 .
- $V_{h_{\text{ane}}}$ = variável hidrológica na área de drenagem não abrangida pelos afluentes estudados.
- $V_{h_{\text{bacia}}}$ = variável hidrológica na estação Traipu.
- $V_{h_{\text{Afluentes}}}$ = variável hidrológica nos afluentes estudados.
- C_d = coeficiente de deságüe, adimensional.
- $V_{T(\text{escoado})}$ = volume total que escoo na seção de deságüe durante o ano considerado, m^3 .
- $V_{T(\text{precipitado})}$ = volume total que precipita na bacia de drenagem que contribui para a seção de deságüe, m^3 .
- c = índice de desempenho.
- r = coeficiente de correlação.
- d = índice de concordância.
- E_i = valor estimado para o i -ésimo evento.
- O_i = valor observado para o i -ésimo evento.
- \bar{O} = média dos valores observados.
- C = coeficiente do tanque, adimensional.
- ECA = evaporação no tanque classe A, $mm \text{ mês}^{-1}$.
- E_w = evaporação no lago, $mm \text{ mês}^{-1}$.
- P = pressão atmosférica na localidade considerada, mb.
- P_s = pressão atmosférica ao nível do mar, mb.
- Δ_p = declividade da curva de pressão de vapor na temperatura de equilíbrio, $mb \text{ } ^\circ C^{-1}$.
- R_{TP} = saldo de radiação na temperatura de equilíbrio, $W \text{ m}^{-2}$.
- υ = pressão de saturação de vapor na temperatura média do ar, mb.
- E_p = evaporação potencial, $mm \text{ mês}^{-1}$.
- f_w = coeficiente de transferência de vapor, adimensional.
- T_p = temperatura de equilíbrio da subcamada de ar próxima à

- superfície, °C.
- ζ = fator de estabilidade.
- f_z = constante para cálculo de evaporação em lagos, igual a $25,0 \text{ W m}^{-2} \text{ mb}^{-1}$.
- v_D = pressão de saturação de vapor 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.
- a = albedo médio.
- G = radiação global 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 na condição de 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 nascer-do-sol ao meio-dia.
- z = ângulo zenital médio diário.
- i = número do mês do ano.
- j = coeficiente de turbidez, adimensional.
- ω' = fração da transmitância absorvida na condição de céu claro.
- θ = declinação do sol.
- ρ = incremento na radiação atmosférica devido às nuvens.
- λ = coeficiente de transferência de calor.

R_s = irradiância 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 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, em equivalente de lâmina de água evaporada, $mm dia^{-1}$.

RESUMO

PEREIRA, Silvio Bueno, D. S., Universidade Federal de Viçosa, agosto de 2004.
Evaporação no lago de Sobradinho e disponibilidade hídrica no rio São Francisco. Orientador: Fernando Falco Pruski. Conselheiros: Demetrius David da Silva, Márcio Mota Ramos e Gilberto Chohaku Sedyama.

A bacia do São Francisco 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. Da nascente, na serra da Canastra, até a foz, no oceano Atlântico, o rio São Francisco percorre aproximadamente 2.700 km, drenando uma área de 639.219 km², que representa 7,5% do território nacional. As águas do rio São Francisco cortam a região do polígono das secas, sendo vitais para a sustentabilidade e desenvolvimento dos municípios situados na bacia. Em virtude de o rio São Francisco representar um importante indutor do desenvolvimento dos diversos estados por ele banhados, o conhecimento do seu comportamento hidrológico é de suma importância para subsidiar a tomada de decisões na gestão de recursos hídricos, uma vez que permitirá conhecer a disponibilidade deste recurso, possibilitando identificar as áreas em que este é ou poderá a vir se tornar escasso, consistindo, portanto, um importante subsídio para a gestão de recursos

hídricos. Dois sérios problemas existentes na gestão de recursos hídricos são relacionados às frequentes inconsistências observadas nas vazões calculadas a partir de séries históricas, as quais são representadas por reduções expressivas nas vazões com o aumento da área de drenagem; e às perdas de água por evaporação nos reservatórios de regularização, fazendo com que estimativas confiáveis de evaporação nos reservatórios sejam essenciais tanto no planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos quanto em estudos de impacto ambiental. Com base nesse enfoque, o presente trabalho teve como objetivos analisar o comportamento hidrológico do rio São Francisco e seus principais afluentes; desenvolver procedimento de ajuste das vazões média e mínima ao longo do rio São Francisco, visando à correção de distorções existentes nas séries históricas; e estimar a evaporação líquida no reservatório de Sobradinho, por meio da metodologia do tanque Classe A e dos modelos Linacre, Kohler et al. e CRLE. Para realização do estudo, analisaram-se os dados hidrológicos anuais pertinentes à precipitação média, a vazão média, a vazão mínima ($Q_{7,10}$ e $Q_{05\%}$) e o coeficiente de deságüe ao longo do rio São Francisco. Com base na análise dos dados disponíveis e do estudo de estacionariedade, optou-se por selecionar os períodos-base de 1950 a 1976 e 1979 a 2000. Para o cálculo da precipitação média na área de drenagem correspondente a cada uma das estações fluviométricas, foi utilizado o método do Polígono de Thiessen. Conhecidas a precipitação média, a vazão média anual e a área de drenagem de cada um dos afluentes estudados, calculou-se a proporção de contribuição dos seguintes afluentes: Pará, Paraopeba, Abaeté, Velhas, Paracatu, Urucuia, Pandeiros, Verde Grande, Carinhanha, Corrente e Grande. Para a correção de comportamentos atípicos ao longo do rio São Francisco, procedeu-se ao ajuste de equações de regressão às séries de dados de cada estação fluviométrica. O cálculo da evaporação no reservatório de Sobradinho foi realizado pelos modelos do tanque Classe A (com coeficiente de tanque de 0,6), Linacre, Kohler et al. e Complementary Relationship Lake Evaporation (CRLE), sendo a evaporação líquida obtida pela diferença entre a evaporação do reservatório e a evapotranspiração real antes da formação do lago. Os resultados permitiram

constatar que: a) as variáveis hidrológicas estudadas (precipitação, vazão média, vazão mínima e coeficiente de deságüe) apresentaram valores médios no período de 1979 a 2000 superiores aos de 1950 a 1976; b) as precipitações e as vazões específicas médias anuais de longa duração diminuíram da nascente para a foz do São Francisco; c) as áreas de drenagem dos afluentes Pará, Paraopeba, Abaeté, Velhas, Paracatu, Urucuia, Pandeiros, Verde Grande, Carinhanha, Corrente e Grande, que representavam 46,3% da área da bacia do São Francisco, contribuíam com 81% da sua vazão; d) a sub-bacia do rio Verde Grande foi a única com precipitação e vazão específica inferiores às médias da bacia do São Francisco; e) as sub-bacias que apresentavam as maiores contribuições para a formação da vazão do São Francisco foram as dos rios Paracatu, Grande e Velhas; f) o procedimento desenvolvido para a compensação de comportamentos atípicos ao longo do rio São Francisco apresentou bom potencial de utilização não só pelo ótimo ajuste obtido das equações propostas, mas também pelo fato de consistir uma boa alternativa em estudos relativos à concessão de outorga para uso de água; g) os valores obtidos pelo modelo Kohler et al. podem ser utilizados como base de referência para a estimativa da evaporação média anual do lago de Sobradinho; h) o coeficiente de tanque que melhor representou a variação sazonal de evaporação no lago de Sobradinho foi 0,57; i) o modelo CRLE foi o que apresentou maior discrepância em relação aos demais; e i) a vazão média anual correspondente à evaporação líquida do reservatório de Sobradinho era de $132 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

ABSTRACT

PEREIRA, Silvio Bueno, D. S., Universidade Federal de Viçosa, August 2004.
Evaporation in lake Sobradinho and water availability in the river São Francisco. Adviser: Fernando Falco Pruski. Committee Members: Demetrius David da Silva, Márcio Mota Ramos and Gilberto Chohaku Sedyama.

The São Francisco basin is located between latitudes 7° 00 ' and 2° 00 ' S and longitudes 35° 00 ' and 47° 40 ' W, spread over the States of Minas Gerais, Bahia, Goiás, Pernambuco, Sergipe, Alagoas, and Distrito Federal. From the headwaters, in the Canastra Ridge Mountains, up to the river mouth, in the Atlantic Ocean, the Rio São Francisco travels approximately 2.700 km, draining a 639.219 km² area, representing 7,5% of the national territory. The São Francisco's waters go through the semi-arid region, being vital for the sustainable development of the cities located in its basin. Because the Rio São Francisco represents an important development inducer in the several states it goes through, the knowledge about its water behavior is crucial to subsidize the decision-making in the management of water resources. This will provide information on water availability, allowing the identification of drought-prone areas, which is an important subsidy for the management of water resources. Two very serious problems in the management of water resources are related to

the frequent inconsistencies observed in the flow calculated upon historical series. They are represented by expressive reductions in the flow with the increase in the drainage area and due to the losses by evaporation in the regularization reservoirs. Therefore, reliable estimates of evaporation are essential in planning and managing water resources and for studies of environmental impact. In this context, the objectives of the present work were to analyze the water behavior of the Rio São Francisco and its main tributaries; to develop a fitting procedure for average and minimum flows along the river, to correct possible existent distortions in the historical series; and to evaluate the net evaporation at Sobradinho reservoir, through the Class-A tank methodology and the models Linacre, Kohler et al. and CRLE. To carry out the study, the annual water data were analyzed for average rainfall, average flow, the minimum flow ($Q_{7, 10}$ and $Q_{95\%}$) and the drainage coefficient along the river. The base-period (1950 to 1976 and 1979 to 2000) was selected based on the analysis of the data available and the seasonality study. The Thiessen Polygon method was used to calculate the average rainfall in the drainage area corresponding to each rain season. Once the average rainfall, the average annual flow and the drainage area of each tributary are known, the proportion of the contribution was calculated for the following ones: Pará, Paraopeba, Abaeté, Old, Paracatu, Urucuia, Tambourines, Verde Grande, Carinhanha, Corrente and Grande. To correct any atypical behavior along the Rio São Francisco, it was carried out the fitting of the regression equations to each rain season data series. Evaporation at Sobradinho reservoir was estimated using Class-A tank (tank coefficient = 0,6), Linacre, Kohler et al. and Complementary Relationship Lake Evaporation (CRLE), models, with net evaporation obtained by the numerical difference between the reservoir evaporation and the real evapotranspiration before the lake formation. The results allowed verifying that: a) the water variables studied (rainfall, average flow, minimum flow and drainage coefficient) presented average values in the period 1979-2000 superiors to 1950-1976; b) annual rainfalls and average specific flows of long duration decreased from the headwaters to the mouth of Rio San Francisco; c) the drainage areas of the tributaries Pará, Paraopeba,

Abaeté, Old, Paracatu, Urucuia, Tambourines, Verde Grande, Carinhanha, Corrente and Grande, representing 46,3% of the São Francisco basin area, contributed 81% to its flow; d) the Verde Grande sub-basin was the only with rainfall and specific flow inferior to the São Francisco's averages; e) the sub-basins presenting the largest contributions to the São Francisco's flow formation were Paracatu, Grande and Velho; f) the procedure developed for the compensation of atypical behaviors along the river São Francisco showed good potential for use not only because the optimal fitting obtained from the proposed equations, but also for being a good alternative in studies referring to water use concession; g) the values obtained by the Kohler et al. model can be used as reference base to estimate the annual average evaporation of lake Sobradinho; h) the tank coefficient that best represented the seasonal variation of evaporation in the lake was 0,57; i) the CRLE model presented the largest discrepancy compared to the others; and j) the annual average flow corresponding to net evaporation of Sobradinho reservoir was $132 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

1. INTRODUÇÃO

A bacia do São Francisco possui uma área de drenagem de 639.219 km², abrangendo parte dos Estados de Minas Gerais, Bahia, Goiás, Pernambuco, Sergipe e Alagoas, além do Distrito Federal, onde se situam 503 municípios e vivem cerca de 14 milhões de pessoas. Com uma disponibilidade hídrica de 64,4 bilhões de m³ por ano, o rio responde por 69% das águas superficiais do Nordeste e apresenta um potencial de acumulação de água de 50,9 bilhões de m³ por ano, correspondente a 60% do total do acúmulo de água superficial do Nordeste.

A importância do rio São Francisco se deve não só ao volume de água transportada numa região semi-árida, mas, principalmente, à sua contribuição histórica e econômica na fixação das populações ribeirinhas e no desenvolvimento de cidades situadas ao longo da bacia, bem como devido ao potencial hídrico passível de aproveitamento em futuros planos de irrigação.

O crescimento da exploração econômica na bacia do São Francisco, principalmente pela agricultura irrigada, foi intensificado a partir da década de 70, sendo a irrigação responsável por 68% da vazão consumida na bacia, que apresentava uma vazão total captada estimada em 203 m³ s⁻¹. A vazão total comprometida pelas outorgas emitidas na bacia era, entretanto, até o ano de 2002, correspondente a um valor da ordem de 541,4 m³ s⁻¹ (GARRIDO, 2003).

Além da irrigação, destaca-se também como importante atividade econômica da bacia a hidroeletricidade, sendo o potencial hidrelétrico total disponível da ordem de 26.320 MW (CODEVASF, 2004), em que somente a hidrelétrica de Sobradinho, um dos maiores lagos artificiais do mundo, apresenta uma potência instalada de 1.050 MW.

Em virtude de o rio São Francisco representar um importante indutor do desenvolvimento dos diversos estados por ele banhados, o conhecimento do seu comportamento hidrológico é de suma importância para subsidiar a tomada de decisões na gestão de recursos hídricos, uma vez que permitirá conhecer a disponibilidade desse recurso, possibilitando identificar as áreas em que este é ou poderá vir a se tornar escasso, consistindo, portanto, em um importante subsídio à gestão de recursos hídricos.

Dois sérios problemas existentes na gestão de recursos hídricos são as freqüentes inconsistências nas vazões calculadas a partir de séries históricas, as quais são representadas por reduções expressivas nas vazões com o aumento da área de drenagem; e as perdas de água por evaporação nos reservatórios de regularização, fazendo com que estimativas confiáveis de evaporação nos reservatórios sejam essenciais tanto no planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos quanto em estudos de impacto ambiental.

Tendo em vista a importância representada pela bacia do São Francisco no desenvolvimento sustentável, principalmente para a Região Nordeste, desenvolveu-se o presente trabalho, que teve como objetivos:

- Analisar o comportamento hidrológico do rio São Francisco e seus principais afluentes.
- Desenvolver procedimento de ajuste das vazões média e mínima ao longo do rio São Francisco, visando à correção de distorções existentes nas séries históricas.
- Estimar a evaporação líquida no reservatório de Sobradinho por meio da metodologia do tanque Classe A e dos modelos Linacre, Kohler et al. e CRLE.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. A bacia do rio São Francisco

A bacia do São Francisco 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. Da nascente, na serra da Canastra, até a foz, no oceano Atlântico, o rio São Francisco percorre aproximadamente 2.700 km, drenando uma área de 639.219 km², que representa 7,5% do território nacional (ANEEL, 1998).

As águas do rio São Francisco cortam a região do polígono das secas (território permanentemente sujeito a períodos críticos de prolongadas estiagens), sendo vitais para a sustentabilidade e desenvolvimento dos municípios situados na bacia (ALMANAQUE..., 2001).

A área, população e número de municípios dos seis estados da República Federativa do Brasil, além de parte do Distrito Federal, que contemplam a bacia do São Francisco estão apresentados no Quadro 1. A população da bacia do São Francisco correspondia, em 2000, a cerca de 8% da população brasileira, estando as maiores concentrações populacionais situadas na região de cabeceira da bacia, onde se encontra a região metropolitana de Belo Horizonte, formada por 33 municípios e com uma população de 4.121.091 habitantes, o que representa

26,5% da população da bacia, sendo a sua área equivalente a apenas 1,4% da área da bacia. Incluídos no polígono das secas estão 363.396 km² (56,8%), nos quais residem 5.892.081 habitantes (37,9%), distribuídos em 270 municípios (54%), enquanto a área do semi-árido é de 335.946 km² (52,6%), onde vivem 5.244.241 habitantes (33,7%) e situam-se 241 municípios (48%) (ANA, 2002).

Quadro 1 – Área, população e número de municípios, por unidade federativa, na bacia do rio São Francisco

Unidade Federativa	Área		População		Municípios	
	km ²	%	Habitantes	%	n ^o	%
Minas Gerais	235.417	36,8	7.595.274	57,2	240	47,7
Goiás	3.142	0,5	107.858	0,8	3	0,6
Distrito Federal	1.336	0,2	2.000	-	1	0,2
Bahia	307.941	48,2	2.663.527	20,1	114	22,7
Pernambuco	69.518	10,8	1.614.565	12,2	69	13,7
Alagoas	14.338	2,2	1.002.900	7,5	49	9,7
Sergipe	7473	1,3	291.831	2,2	27	5,4
Total	639.219	100	13.297.955	100	503	100

FONTE: IBGE – Censo 2000, citado pela ANA/GEF/PNUMA/OEA (2003).

Devido à extensão da bacia do São Francisco e aos diferentes ambientes percorridos, ela é dividida em quatro unidades fisiográficas: a região do Alto São Francisco, correspondente a 19% da área da bacia, que vai da nascente até a cidade de Pirapora (MG); o Médio São Francisco, que vai de Pirapora até Remanso (BA), correspondendo a 55% da bacia; o Submédio São Francisco, que vai de Remanso até Paulo Afonso (BA) (24% da bacia); e o Baixo São Francisco, que vai de Paulo Afonso até a foz (7% da bacia). Na Figura 1, apresentam-se a hidrografia, os principais reservatórios e as unidades fisiográficas da bacia do São Francisco.

A bacia do rio São Francisco possui 36 afluentes mais importantes, dos quais apenas 19 são perenes, destacando-se entre estes, pela margem direita, os rios Pará, Paraopeba, Velhas e Verde Grande e, pela margem esquerda, os rios Abaeté, Paracatu, Urucuia, Pandeiros, Carinhanha, Corrente e Grande. As áreas de drenagem desses afluentes, com exceção do rio Verde Grande, estão situadas

na região da bacia não abrangida pelo polígono das secas e, embora representem apenas cerca de 50% da área total da bacia, contribuem para a formação de 85% das vazões mínimas e 74% das vazões máximas observadas na bacia (ANEEL, 1998).

Entre a nascente e a foz da bacia do São Francisco há uma diferença de nível de aproximadamente 1.000 m, sendo as maiores declividades encontradas nas cabeceiras e nas proximidades da foz da bacia. Nos primeiros 120 km há um desnível de 250 m e nos seguintes 360 km (até Três Marias), outros 180 m de desnível. Desse ponto até Sobradinho, em 1.416 km, o rio desce 176 m. No trecho entre Paulo Afonso, localizado a 284 km da foz, e Pão de Açúcar, a 171 km da foz, o rio desce mais de 300 m, correspondendo ao trecho das grandes quedas (RAMOS e SILVA, 2001).

Na bacia, tem-se a ocorrência dos climas: úmido, subúmido-úmido, subúmido-seco, semi-árido e árido. O clima caracteriza-se pela ocorrência de temperaturas de mediana a elevada durante quase todo o ano, com temperatura média anual variando de 18 a 27 °C e, ainda, por um baixo índice de nebulosidade com grande incidência de radiação solar e pela existência de duas estações bem distintas, uma seca e outra chuvosa (BRASIL, 2003). Segundo CBH-SF (2004), o trimestre mais chuvoso ocorre de novembro a janeiro, contribuindo com 55 a 60% da precipitação ocorrida no ano, sendo o trimestre mais seco nos meses de junho a agosto.

Em função das elevadas temperaturas e dos baixos índices de nebulosidade, a evapotranspiração potencial é muito alta, principalmente na região do Submédio São Francisco, onde algumas estações registram valores de até 3.000 mm ano⁻¹. A elevada evapotranspiração potencial não compensada pelas chuvas afeta, expressivamente, o balanço hídrico dos solos (IORIS, 2001).

A bacia do rio São Francisco drena regiões de precipitações superiores a 2.000 mm nas suas cabeceiras, em Minas Gerais, até a zona semi-árida/árida da Bahia e de Pernambuco, com precipitações da ordem de 400 mm, aumentando daí em direção à foz, onde os valores médios anuais são em torno de 1.300 mm (RAMOS e PRUSKI, 2003).

A vazão média de longa duração na foz do rio São Francisco é apresentada na literatura com valores variando de $2.850 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (RAMOS e SILVA, 2001) a $3.360 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (ANEEL, 1998), com a ressalva de que cerca de 72% dessa vazão advém do Estado de Minas Gerais, 22% corresponde à contribuição advinda do Estado da Bahia e os restantes 6% se distribuem entre Pernambuco, Alagoas e Sergipe. As contribuições dos rios que nascem no Distrito Federal e em Goiás são reduzidas, estando incorporadas às de Minas Gerais (RODRIGUEZ e HOLTZ, 2003).

Com uma disponibilidade de 64,4 bilhões de m^3 por ano, o rio São Francisco responde por 69% das águas superficiais do Nordeste. A capacidade total de acumulação de água superficial dessa região é de 85,1 bilhões de m^3 e, desses, 50,9 bilhões, ou seja, 59,8%, localizam-se na bacia do São Francisco. Sobradinho acumula 34,1 bilhões, Itaparica 11,8 bilhões, Xingó 3,8 bilhões e Moxotó 1,2 bilhão. Três Marias, fora da região Nordeste, porém na bacia, acumula outros 19,3 bilhões de m^3 (ALMANAQUE..., 2001).

No que diz respeito aos usos consuntivos, a demanda de água na bacia do São Francisco é de $203 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Desse total, $35 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (17,2%) são derivados para atender ao abastecimento urbano, $138 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (68,0%) para a irrigação, $8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (3,9%) para a dessedentação de animais e $13 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (6,4%) para a atividade industrial (SRH/MMA, 2002).

A bacia do São Francisco tem 40% de sua área com terras aptas para a agricultura. No Alto e na região superior do Médio São Francisco, onde as chuvas são mais abundantes e regulares, a agricultura de sequeiro é a principal atividade agrícola. Na parte inferior do Médio e do Submédio, essa atividade é limitada, porque toda a região está incluída no semi-árido. A área irrigada na bacia do São Francisco, de acordo com o Plano Nacional de Recursos Hídricos, é de 342.900 ha, correspondendo a 11% dos 3,1 milhões de hectares irrigados no Brasil, distribuídos da seguinte forma: 47.800 ha no Alto São Francisco, 155.900 ha no Médio São Francisco, 101.100 ha no Submédio São Francisco e 38.100 ha no Baixo São Francisco (CODEVASF, 1999; ANA, 2004).

O crescimento da exploração econômica na bacia do São Francisco, principalmente pela agricultura irrigada, foi intensificada a partir de 1976 (ONS, 2004), com destaque para as regiões do Submédio e Baixo São Francisco (RODRIGUEZ e HOLTZ, 2003).

Segundo LIMA e MIRANDA (2001), de 1970 a 1990 a área irrigada na bacia do São Francisco teve um aumento da ordem de 286%, o que corresponde a $8.620 \text{ ha ano}^{-1}$, enquanto a taxa de crescimento no país foi de 266%.

Dentre os principais perímetros irrigados dessa bacia, destacam-se os projetos Jaíba e Senador Nilo Coelho, com áreas irrigadas de 16.203 ha e 20.916 ha, respectivamente (CODEVASF, 2004).

O projeto Senador Nilo Coelho, implantado pela Companhia de Desenvolvimento do Vale do São Francisco e do Parnaíba (CODEVASF), é o maior perímetro irrigado atualmente explorado no Brasil (GOMES, 2001). Está localizado na região do Submédio São Francisco, às margens do rio São Francisco, nas cidades de Petrolina (PE) e Juazeiro (BA), onde as condições climáticas locais da região favorecem o uso da agricultura irrigada, apresentando limitação à prática da agricultura de sequeiro devido ao volume total anual precipitado, que nessa região varia de 400 a 600 mm (PEREIRA et al., 2003).

Os projetos de irrigação na bacia não apresentam adequado planejamento e, após sua implementação, não têm recebido um manejo correto. A irrigação ineficiente e inadequada resulta em desperdício de água e energia. RAMOS e PRUSKI (2003) evidenciaram a necessidade de otimização das estratégias de manejo da irrigação na bacia.

A importância do rio São Francisco se deve não só ao volume de água transportada numa região semi-árida, mas, principalmente, à sua contribuição histórica e econômica na fixação das populações ribeirinhas e na criação das cidades situadas ao longo da bacia, bem como devido ao potencial hídrico passível de aproveitamento em futuros planos de irrigação (SILVA e RAMOS, 2001).

Além da irrigação, o rio São Francisco tem seu potencial hidrelétrico bastante aproveitado, com as seguintes usinas hidrelétricas já instaladas: Cajuru,

Conselheiro Mata, Gafanhoto, Pandeiros, Paraúna, Rio das Pedras, Três Marias, Sobradinho, Itaparica, Moxotó, Paulo Afonso e Xingó. As sete primeiras estão localizadas no Alto São Francisco e as restantes, no Submédio e Baixo São Francisco (LIMA et al., 2001).

Em 1973, a Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF) começou a construção do reservatório de Sobradinho, cujo lago formado, em 1979, e com a superfície de 4.214 km² é um dos maiores lagos artificiais do mundo, servindo como reservatório de regularização plurianual. O reservatório de Sobradinho localiza-se no Submédio São Francisco, a cerca de 40 km a montante das cidades de Juazeiro e Petrolina, sendo sua potência instalada de 1.050 MW (CORREIA e DIAS, 2003).

Conforme dados do Sistema de Informação do Potencial Hidrelétrico Brasileiro (SIPOT), do Grupo Coordenador do Planejamento dos Sistemas Elétricos e das Centrais Elétricas Brasileiras, a bacia do São Francisco tem um potencial hidrelétrico da ordem de 26.346 MW, dos quais 10.395 MW estão distribuídos em usinas hidrelétricas em operação na bacia (CBHSF, 2004).

2.2. Gestão de recursos hídricos e desenvolvimento sustentável

Desenvolvimento sustentável corresponde ao desenvolvimento social e econômico estável e equilibrado, com mecanismos de distribuição das riquezas geradas e com capacidade de considerar a fragilidade, a interdependência e as escalas de tempo próprias e específicas dos elementos naturais. Significa, ainda, gerar riquezas utilizando os recursos naturais de modo sustentável e respeitar a capacidade de recuperação e recomposição desses recursos, criando mecanismos que permitam o acesso a esses recursos por toda a sociedade. A implementação do desenvolvimento sustentável implica, portanto, mudanças de comportamento pessoal e social, além de transformações nos processos de produção e de consumo (LANNA, 1995).

Existem grandes dificuldades na determinação do limite de sustentabilidade de cada recurso, principalmente ao serem consideradas as inter-

relações e as sinergias estabelecidas nas respectivas cadeias produtivas e as pressões antrópicas a que esses recursos estão sujeitos. Enquanto não se pode contar com todo o conhecimento necessário à exploração adequada dos recursos naturais, deve-se reconhecer que a sustentabilidade do uso desses recursos passa pela utilização racional, pelo planejamento e pela participação dos usuários na definição de responsabilidades e na viabilização e perpetuação dos recursos hídricos para as gerações futuras (ANJOS, 2003).

Os recursos hídricos são bens de relevante valor para a promoção do bem-estar de uma sociedade. Com o aumento da intensidade e variedade dos usos ocorrem conflitos entre usuários. Uma forma eficiente de evitar e administrar esses conflitos é a gestão integrada do uso, o controle e a conservação dos recursos hídricos (TUCCI et al., 2001).

A abordagem integrada do planejamento do uso e da gestão compartilhada dos recursos naturais é prática necessária e inadiável. É possível reduzir os conflitos da utilização dos recursos hídricos a um patamar mínimo, promovendo alternâncias espaciais ou de recurso utilizado para usos mais eficientes. Além disso, a vinculação do desenvolvimento social e econômico à proteção e à melhoria do meio ambiente pode contribuir decisivamente para o atendimento dos objetivos do desenvolvimento sustentável (ANJOS, 2003).

Para se praticar o desenvolvimento sustentável, é necessário dispor de bancos de informações e metodologias apropriadas à quantificação dos recursos hídricos. Logo, o processo de gestão de recursos hídricos deve ser constituído por uma política que estabeleça as diretrizes gerais, por um modelo de gerenciamento que estabeleça a organização administrativa e funcional e por um sistema de gerenciamento constituído pelo conjunto de organismos, agências e instalações governamentais e privadas para a execução da política (FREITAS, 2000).

A Lei 9.433, de 8 de janeiro de 1997, instituiu a Política Nacional de Recursos Hídricos e criou o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos e foi um grande passo para o gerenciamento de tais recursos. Essa lei tem como preceitos básicos: a adoção da bacia hidrográfica como unidade de planejamento; a consideração dos múltiplos usos da água; o reconhecimento da

água como um bem finito, vulnerável e dotado de valor econômico; e a necessidade da consideração da gestão descentralizada e participativa desse recurso (BRASIL, 1997).

O reconhecimento da água como um bem finito e vulnerável serve de alerta para a necessidade de conservação desse bem natural, enquanto o reconhecimento do valor econômico da água induz o uso racional desse recurso e serve de base para a instituição da cobrança pela sua utilização. O princípio de gestão descentralizada refere-se a uma proposta de que tudo que puder ser decidido no âmbito de governos regionais, e mesmo locais, não deve ser tratado em nível do governo federal, sendo necessária a gestão participativa envolver os usuários, a sociedade civil organizada, as ONGs e outras entidades interessadas no processo de tomada de decisão (SETTI et al., 2001).

A Política Nacional de Recursos ressalta a importância de cinco instrumentos essenciais à boa gestão dos recursos hídricos: a outorga de direito de uso dos recursos hídricos, a cobrança pelo uso da água, o enquadramento dos corpos d'água em classes de uso, o Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos e o Plano Nacional de Recursos Hídricos (BRASIL, 1997).

A outorga é uma ferramenta indispensável de gestão dos recursos hídricos, pois permite aos gestores o controle quantitativo e qualitativo dos usos da água, ao mesmo tempo que garante ao usuário o aproveitamento de água em um local específico de um manancial hídrico, no qual a vazão e o tipo e tempo de uso devem ser previamente definidos. A outorga assegura, portanto, o direito de uso da água de forma específica e intransferível.

A outorga não dá ao usuário a propriedade da água ou a sua alienação, mas o simples direito de seu uso, portanto, poderá ser suspensa, parcial ou totalmente, em casos extremos de escassez ou de não cumprimento pelo outorgado dos termos de outorga previstos nas regulamentações, ou por necessidade premente de se atenderem aos usos prioritários e de interesse coletivo.

Existem grandes diferenças nos critérios para outorga entre os estados federados em relação às águas superficiais (GARRIDO, 2003). A vazão a ser

outorgada varia com o regime do rio e em função da legislação estadual. Em rios perenes, a outorga é usualmente feita com base na vazão mínima de sete dias de duração e período de retorno de 10 anos ($Q_{7,10}$) ou nas vazões mínimas associadas às permanências de 95% ($Q_{95\%}$) e 90% ($Q_{90\%}$), atribuindo-se valores percentuais a elas, ou seja, outorgando-se apenas parte desses valores de vazões mínimas. Para rios intermitentes, o processo de outorga torna-se mais complexo, pois na época da seca o rio deixa de apresentar vazão.

Tendo em vista a grande área da bacia do São Francisco e o fato de o rio percorrer seis estados da federação, além do Distrito Federal, existem expressivas diferenças nos critérios adotados para a concessão de outorga em diferentes posições da rede hidrográfica da bacia. GARRIDO (2003) apresentou os critérios utilizados nos estados banhados pelo São Francisco (Quadro 2).

Quadro 2 – Vazão máxima permissível para outorga de águas superficiais em alguns dos estados percorridos pelo rio São Francisco

Unidade Federativa	Critério Considerado
Alagoas	Não definido
Bahia	80% da $Q_{90\%}$
Distrito Federal	80% da $Q_{90\%}$
Goiás	10% da $Q_{7,10}$
Minas Gerais	30% da $Q_{7,10}$
Pernambuco	80% da $Q_{90\%}$
Sergipe	Não definido

FONTE: Conselho Nacional de Recursos Hídricos, citado por GARRIDO (2003).

A União adota a vazão correspondente a 70% da $Q_{95\%}$ como critério de outorga para águas superficiais, podendo ser essa vazão adaptada ao critério de cada estado. A vazão total comprometida pelas outorgas emitidas na bacia do São Francisco até o ano de 2002 correspondia a uma vazão da ordem de $541,4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (GARRIDO, 2003).

Na determinação das vazões mínimas de referência a serem utilizadas no processo de outorga de uso da água, uma das principais limitações encontradas diz respeito às inconsistências na base de dados fluviométricos. Pela análise do estudo realizado por RAMOS e PRUSKI (2003) sobre o comportamento das vazões médias, máximas e mínimas em diversas estações fluviométricas situadas

na bacia do São Francisco, foi possível evidenciar, a partir da comparação entre as vazões calculadas nas diversas estações fluviométricas, várias inconsistências, inclusive com grandes reduções na magnitude dessas variáveis nas estações com maior área de drenagem.

Outro fator de grande importância na análise da vazão máxima permissível para a concessão de outorga são as perdas de água por evaporação nos reservatórios de regularização. A obtenção dos valores de evaporação permite avaliar a quantidade de água que se perde ou se ganha com a construção de um reservatório (KAN e DIAS, 1999). Portanto, estimativas confiáveis de evaporação nos reservatórios são essenciais tanto no planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos quanto em estudos de impacto ambiental.

2.3. Evaporação em reservatórios

A evaporação em lagos é considerada como “perda” pelos planejadores de recursos hídricos, sendo necessário fazer sua estimativa tanto na época do projeto quanto ao longo do período de operação de um reservatório (DIAS e KELMAN, 1987).

O desenvolvimento de métodos confiáveis para estimativa da evaporação em lagos, baseados em informações climatológicas de fácil obtenção, ainda é um desafio. A maioria dos métodos atualmente disponíveis estima a evaporação a partir de observações de temperatura, umidade, velocidade do vento e radiação solar ou usa as medidas de evaporação feitas em tanques instalados em estações meteorológicas situadas no ambiente terrestre (ROQUE e SANSIGOLO, 2001).

Os modelos disponíveis para estimar a evaporação em lagos normalmente são divididos, em termos práticos, em duas classes: os que utilizam equações baseadas em informações climatológicas para a predição da evaporação, como os modelos propostos por MORTON (1983a), LINACRE (1993) e KOHLER et al. (1955), entre outros, e os que empregam medidas de tanques de evaporação.

Um dos principais problemas na utilização de modelos climatológicos na estimativa da evaporação é a escassez de dados climatológicos sobre a superfície do lago, fazendo-se uso das informações climatológicas de estações situadas no ambiente terrestre e, portanto, não representativas do ambiente sobre o lago; no caso do uso de medidas feitas em tanques, é a escolha do coeficiente do tanque (REIS e DIAS, 1998).

2.3.1. Tanque Classe A

Segundo GANGOPADHYAYA et al. (1966), o método do tanque Classe A é o mais comum para estimar a evaporação em lagos, consistindo sua aplicação na multiplicação de um coeficiente de tanque, que relaciona a evaporação no tanque com o lago, pelo valor medido da evaporação no tanque. O uso do tanque Classe A, além de aplicável à estimativa da evaporação em lagos ou reservatórios já existentes, é também utilizado para a elaboração de projetos de construção de novos reservatórios. Esses autores fazem algumas considerações quanto aos aspectos climáticos que podem afetar o coeficiente do tanque Classe A na estimativa da evaporação em lagos. O coeficiente 0,7 é utilizado no caso em que as temperaturas do ar e da água no tanque são iguais, enquanto em climas quentes e áridos, quando a temperatura média da água é menor que a do ar, aplica-se o coeficiente 0,6. Em regiões úmidas, quando a temperatura da água no tanque for maior que a do ar, deve ser utilizado o coeficiente 0,8.

HOUNAM (1973) também verificou uma variação espacial no uso do coeficiente de tanque Classe A, variando de 0,60 em regiões áridas a 0,80 em regiões úmidas, em vários lagos dos Estados Unidos. Entretanto, evidenciaram variações sazonais na determinação do coeficiente, as quais foram de grandes magnitudes, impedindo o uso de um valor constante na estimativa da evaporação em lagos.

ROQUE e SANSIGOLO (2001) apresentaram, em algumas localidades dos Estados Unidos, os coeficientes de tanque Classe A a serem utilizados para a

estimativa de evaporação em lagos, os quais correspondem a: 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. Essas variações indicam que os lagos criam condições ambientais próprias, que diferem daquelas do ambiente terrestre, sobretudo quando o clima é árido.

Analisando a evaporação do lago de Ilha Solteira (SP), TOVATI (1987) obteve coeficientes de tanque de 0,84 no ano de 1983, quando a precipitação média anual foi de 1.401 mm e 0,80 no ano de 1984, com precipitação média de 808 mm, resultados que comprovam a influência das condições climáticas na estimativa da evaporação. VILLA NOVA (1980), determinando os coeficientes de tanque em lagos localizados na região de Piracicaba (SP), evidenciou que o valor mais representativo foi de 0,76.

ONS (2003), citando Leimbock, mencionou que os coeficientes de tanque mais representativos nos açudes de Forquilha e Araras, ambos situados no Ceará, foram de 0,78 e 0,75, respectivamente.

2.3.2. Modelo Morton

Pelo modelo de MORTON (1983b), denominado Complementary Relationship Areal Evapotranspiration (CRAE), pode-se calcular a evapotranspiração real ou regional de uma grande área ou, mesmo, a evaporação do lago, pelo modelo de Morton denominado Complementary Relationship Lake Evaporation (CRLE).

A principal vantagem da aplicação desses dois modelos é que eles não necessitam de coeficientes localmente calibrados, além do fato de que são requeridas, como variáveis de entrada, somente observações meteorológicas de rotina, como as médias mensais de temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento, precipitação e insolação (TROVATI, 1987).

O modelo CRAE está fundamentado no conceito de que existe relação complementar entre a evapotranspiração potencial e a real referente a uma grande área, que é em função da disponibilidade de água no solo para a evapotranspiração. A representação da relação complementar é dada pela equação 1:

$$E_{TR} + E_{TP} = 2E_{TW} \quad (1)$$

em que:

E_{TR} = evapotranspiração real ou regional, mm mês⁻¹;

E_{TP} = evapotranspiração potencial, mm mês⁻¹; e

E_{TW} = evapotranspiração de equilíbrio, mm mês⁻¹.

A evapotranspiração real ou regional é a correspondente a uma área grande o bastante para que os efeitos dessa evapotranspiração definam o campo da temperatura e da umidade do ar, de maneira que os efeitos da camada de ar transportada da vizinhança (efeito oásis) sejam desprezíveis.

A evapotranspiração potencial é estimada pela solução simultânea das equações do balanço de energia e transferência de vapor, representando a evapotranspiração que ocorreria numa superfície úmida hipotética, com absorção de radiação e taxas de transferência de vapor similares às de áreas pequenas o suficiente para que os efeitos da evapotranspiração no ar sobrepassante fossem desprezados.

A evapotranspiração de equilíbrio corresponde à do ambiente úmido, ou seja, que ocorreria se as superfícies solo-planta estivessem muito úmidas e não houvesse limitações à disponibilidade de água.

Na Figura 2, encontra-se a representação esquemática da relação complementar sob a condição de suprimento de energia radiante constante. Quando não há disponibilidade de água para a evapotranspiração regional, esta é nula. A atmosfera é muito quente e seca, e a evapotranspiração potencial tem sua

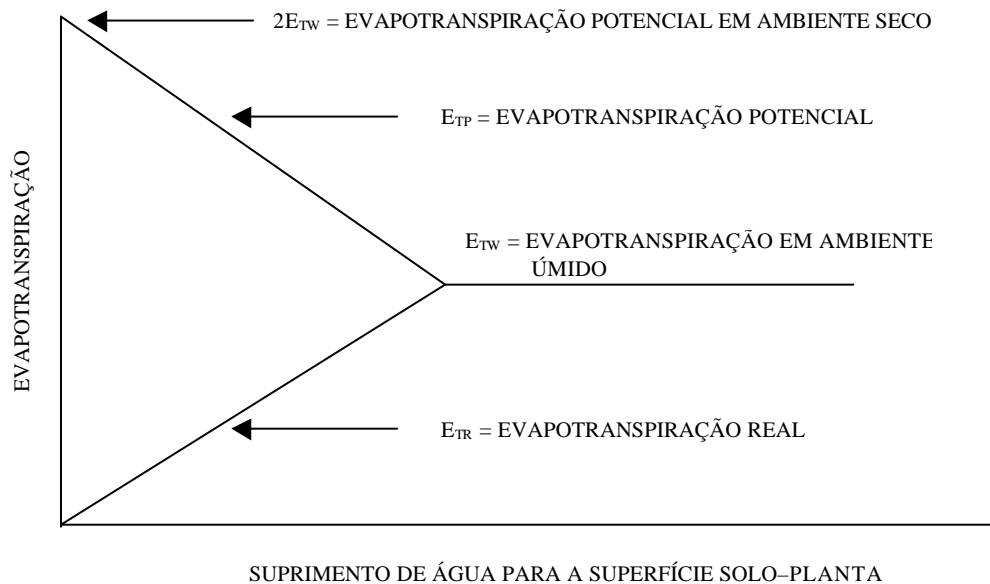


Figura 2 – Representação da relação complementar entre a evapotranspiração real (E_{TR}) e a potencial (E_{TP}), para um suprimento constante de energia radiante.

taxa máxima, correspondendo ao dobro da evapotranspiração de equilíbrio. Quando a água disponível na superfície solo-planta da região aumenta, a resultante, equivalente à evapotranspiração real, também aumenta, o que torna a camada de ar mais fria e úmida. Tal alteração provoca decréscimo equivalente na evapotranspiração potencial.

Quando o suprimento de água na superfície solo-planta da área estiver aumentado suficientemente, os valores das evapotranspirações real e potencial convergem para a evapotranspiração de equilíbrio. Portanto, a evapotranspiração potencial sob condições completamente úmidas é igual à metade em condições completamente áridas (MORTON, 1983b).

A Figura 3 representa esquematicamente a relação complementar entre a evaporação do lago e a evaporação potencial no ambiente terrestre em condições de suprimento constante de energia radiante. A evaporação de um lago raso difere da evapotranspiração regional de ambiente úmido apenas porque a absorção da radiação e a transferência de vapor característico da água diferem daquelas da superfície de solo onde há vegetação. A evaporação potencial também difere da evapotranspiração potencial pelas mesmas razões. Embora a

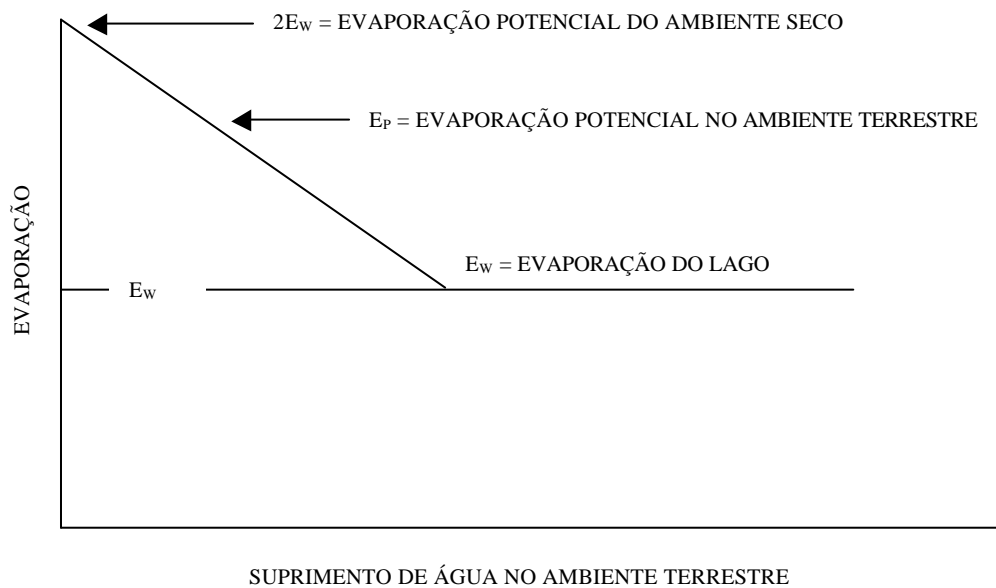


Figura 3 – Representação da relação entre as evaporações do lago (E_w) e potencial (E_p) no ambiente de terra com fornecimento de energia radiante constante.

evaporação do lago seja igual à potencial no ambiente do lago, ela pode diferir expressivamente dessa mesma evaporação no ambiente de terra (MORTON, 1983b).

Quando não há água disponível para a evapotranspiração no ambiente terrestre adjacente, a evapotranspiração real é nula, com o ar quente e seco, a evaporação potencial atinge sua taxa máxima, correspondendo ao dobro da evaporação potencial do lago. Assim que a disponibilidade de água para a vegetação aumenta, há aumento equivalente da evapotranspiração real, que provoca umedecimento e resfriamento do ar na região, que, por sua vez, leva a uma diminuição na evaporação potencial (TOSTES, 1993). Quando a disponibilidade de água aumenta expressivamente, os valores da evaporação potencial convergem para a evaporação no lago. A relação complementar prevê que a evaporação potencial num ambiente terrestre completamente seco pode ser até duas vezes a evaporação do lago e decrescer em resposta ao aumento no suprimento de água às superfícies solo-planta adjacentes até alcançar um mínimo, igual à evaporação do lago.

Davenport e Hudson, citados por MORTON (1983b), verificaram que a passagem de uma massa de ar provinda de uma área desértica ou de uma área não

irrigada com cultura de algodão irrigado causava maior evaporação nos evaporímetros instalados na borda da área cultivada mais próxima à origem do vento. À medida que a massa de ar avançava sobre o campo cultivado, diminuía rapidamente a evaporação medida nos evaporímetros, aproximando-se de um valor constante a uma distância de 300 m (Figura 4). A partir de 40 a 50 m da borda do campo cultivado, a variação dos valores de evaporação tornou-se pequena, em virtude da redução da capacidade evaporativa do ar, que atingiu o valor-limite da evapotranspiração de equilíbrio, correspondendo a um ambiente úmido.

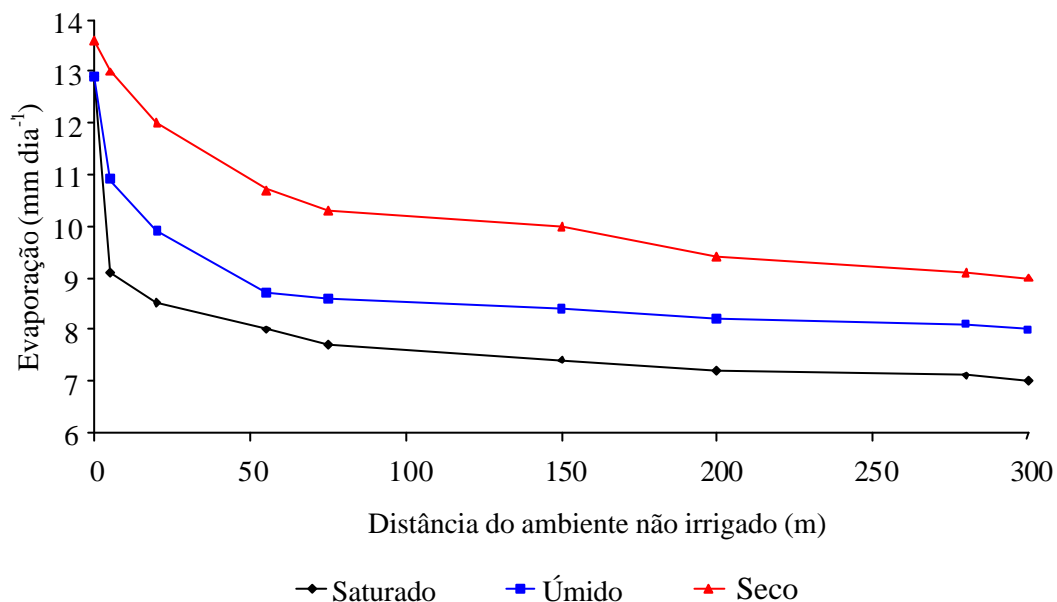


Figura 4 – Evaporação obtida por evaporímetros em três campos cultivados com algodão.

MORTON (1983b) demonstrou que o método da relação complementar possui algumas limitações quanto ao seu uso: requer dados precisos de temperatura e umidade relativa do ar e representativos da área de interesse, sendo essa a mais séria limitação para sua utilização; não pode ser utilizado em pequenos intervalos de tempo, por causa da variação no armazenamento subsuperficial de energia; não pode ser empregado próximo a ambientes frios descontínuos, como em altas latitudes ou nas extremidades de oásis, devido à

advecção do calor e vapor de água da subcamada da atmosfera; e não pode ser utilizado para prever o efeito das mudanças naturais ou feitas pelo homem, porque seu uso não requer conhecimento do solo e da vegetação.

ROQUE e SANSIGOLO (2001) compararam as estimativas mensais de evaporação do lago de Taquaruçu (SP) calculadas com o modelo conceitual CRLE com as obtidas pelo método do tanque Classe A, no período de 1976 a 1997. Concluíram que o modelo de Morton superou as estimativas feitas pelo tanque Classe A, no caso dos valores de evaporação abaixo da média mensal, e subestimou aqueles acima da média. Considerando todas as estimativas realizadas, as medidas do tanque Classe A foram, em média, 14% superiores em relação às estimativas de evaporação pelo modelo de Morton.

2.3.3. Modelo Linacre

LINACRE (1977) propôs uma simplificação do método de Penman para a estimativa da evaporação média mensal de uma área bem suprida de umidade, em razão do fato de vários autores terem mostrado que uma grande desvantagem do método de Penman é a necessidade de informações climatológicas que muitas vezes não estão disponíveis.

O modelo proposto requer somente os valores de temperatura média do ar e das coordenadas geográficas do local. A equação foi calibrada utilizando os valores obtidos com a equação de Penman (LINACRE, 1977).

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

em que:

- E_L = evaporação no lago, mm mês⁻¹;
- T = temperatura média do ar, °C;
- h = altitude do local, m;

- ϕ = latitude local, graus; e
 T_d = temperatura média mensal do ponto de orvalho, °C.

A principal desvantagem da equação 2 refere-se à falta de sensibilidade aos termos aerodinâmicos e ao saldo de radiação. Tendo em vista esse fato, LINACRE (1993) propôs uma nova simplificação da equação de Penman para a estimativa da evaporação em lagos quando os dados de precipitação e de velocidade do vento são também conhecidos. O modelo foi testado em três lagos dos Estados Unidos, cujos resultados foram satisfatórios.

2.3.4. Modelo Kohler et al.

O modelo proposto por Kohler, Nordenson e Fox (KOHLER et al., 1955), utilizado para a estimativa da evaporação em lagos, consiste também em uma adaptação da equação de Penman feita a partir de várias observações de evaporações em lagos.

KOHLER et al. (1955) apresentaram uma correção positiva para o coeficiente psicrométrico, a fim de compensar a igualdade considerada entre a temperatura do ar e a temperatura da água na equação de Penman e também o fato de que o saldo de radiação na superfície em todo o comprimento de onda pode ser derivado como uma função da temperatura e radiação global. Esses autores chegaram à seguinte equação:

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

em que:

- Q_{ir} = diferença entre radiação solar incidente e refletida, mm dia⁻¹;
 ϵ = constante de emissividade igual a 0,92;

- σ = constante de Stefan-Boltzmann igual a $4,903 \cdot 10^{-9} \text{ MJ K}^{-4} \text{ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$;
 T_a = temperatura média do ar, K;
 Δ = declividade da curva de pressão de vapor, $\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$;
 γ = constante psicrométrica 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 dia^{-1} .

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

$$f(u) = 1,361 + 0,01102 U \quad (4)$$

em que U é a velocidade do vento a 2 m de altura, km dia^{-1} .

O poder evaporante do ar é expresso pela equação:

$$E_a = f(u) (e_s - e_a) \quad (5)$$

em que:

- e_s = pressão de saturação de vapor a 2 m de altura, kPa; e
 e_a = pressão parcial de vapor a 2 m de altura, kPa.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Análise do comportamento hidrológico na bacia do São Francisco

No estudo foram analisados os dados consistidos de 178 estações pluviométricas e 23 fluviométricas pertencentes à rede hidrometeorológica da Agência Nacional de Águas (ANA). Dentre as estações fluviométricas estudadas, 12 localizavam-se no rio São Francisco. As 11 restantes correspondiam às estações fluviométricas mais próximas da foz de cada um dos seguintes afluentes: Pará, Paraopeba, Abaeté, Velhas, Paracatu, Urucuia, Pandeiros, Verde Grande, Carinhanha, Corrente e Grande.

Na Figura 5 estão apresentadas as principais sub-bacias estudadas e suas áreas de drenagem, bem como as proporções da área da sub-bacia em relação à da bacia do São Francisco.

Com base na análise dos dados disponíveis, optou-se por selecionar o período-base de 1950 a 2000, sendo apresentados no Apêndice A os mapas com a localização das estações pluviométricas e fluviométricas utilizadas no estudo, assim como o diagrama de barra das estações fluviométricas situadas na bacia do São Francisco.

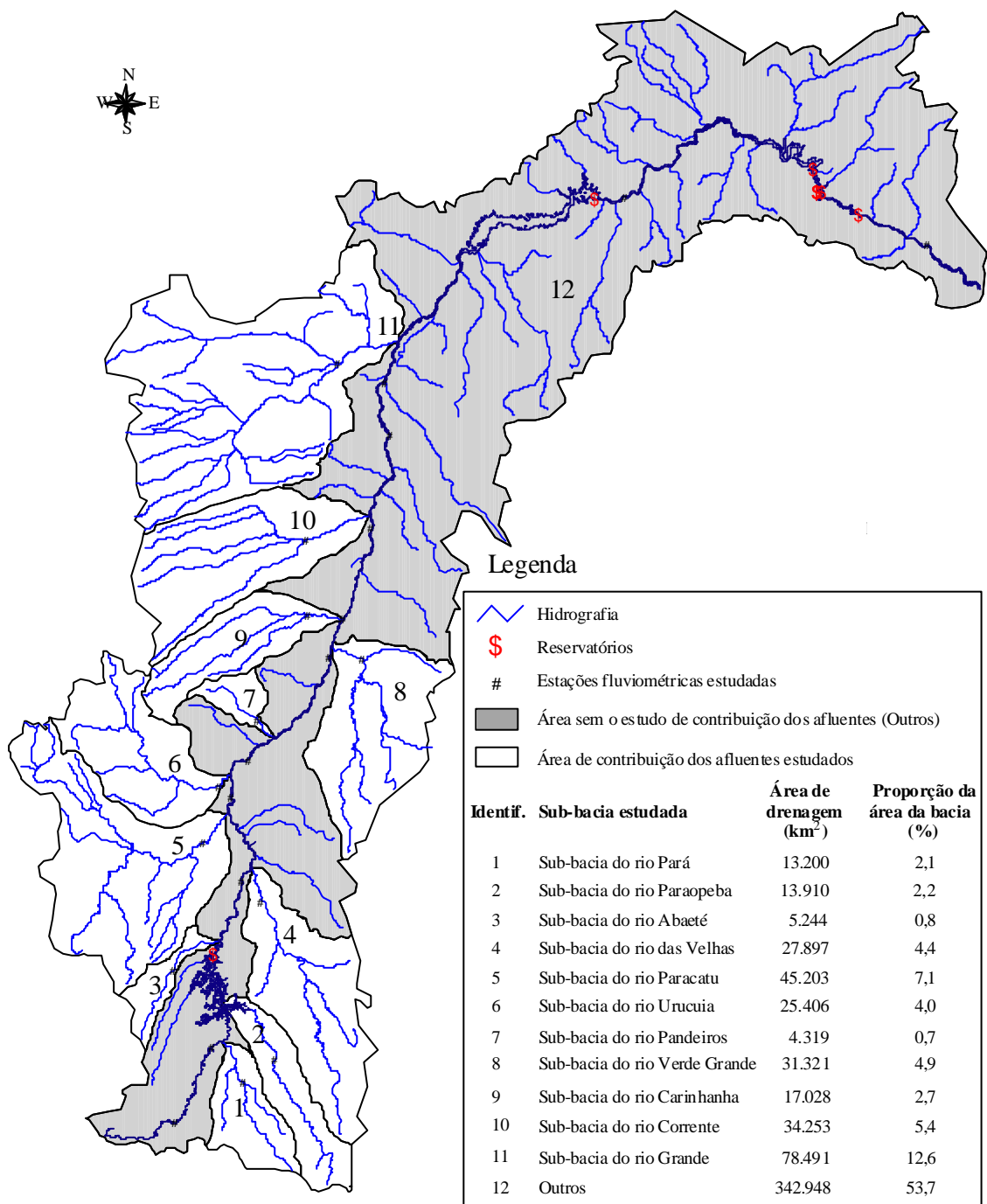


Figura 5 – Principais sub-bacias do rio São Francisco, suas áreas de drenagem, proporções em relação à bacia e localização das estações fluviométricas estudadas.

No Quadro 3 estão apresentadas as estações fluviométricas utilizadas no estudo, bem como a latitude, a longitude, a área de drenagem, o rio onde se situam e a região fisiográfica a que pertencem.

Quadro 3 – Estações fluviométricas selecionadas para o estudo, seus códigos, coordenadas geográficas, áreas de drenagem, sub-bacias e regiões a que pertencem

Código	Estação	Latitude	Longitude	Área de Drenagem (km ²)	Rio	Região
40050000	Iguatama	20°10'12"	45°42'57"	4.846	São Francisco	
40100000	Porto das Andorinhas	19°16'43"	45°17'09"	13.087	São Francisco	
40330000	Velho da Taipá	19°41'38"	44°55'51"	7.350	Pará	
40850000	Ponte da Taquara	19°25'23"	44°32'52"	8.720	Paraopeba	Alto
41075001	Porto do Passarinho	18°24'09"	45°44'12"	4.330	Abaeté	
41135000	Pirapora-Barreiro	17°21'39"	44°56'52"	61.880	São Francisco	
41990000	Várzea da Palma	17°35'39"	44°42'51"	25.940	Velhas	
42980000	Porto Alegre	16°54'25"	45°22'57"	40.300	Paracatu	
43200000	São Romão	16°22'19"	45°03'59"	154.100	São Francisco	
43980000	Barra do Escuro	16°16'07"	45°14'16"	24.658	Urucuia	
44200000	São Francisco	15°56'51"	44°52'04"	182.537	São Francisco	
44250000	Usina do Pandeiros	15°28'59"	44°46'02"	3.812	Pandeiros	
44500000	Manga	14°45'24"	43°55'56"	202.400	São Francisco	
44950000	Boca da Caatinga	14°47'05"	43°32'22"	28.321	Verde Grande	Médio
45260000	Juvenília	14°15'46"	44°09'39"	15.600	Carinhanha	
45298000	Carinhanha	14°18'16"	43°46'05"	251.209	São Francisco	
45480000	Bom Jesus da Lapa	13°15'25"	43°26'06"	273.750	São Francisco	
45910000	Santa Maria da Vitória	13°24'00"	44°12'00"	29.570	Corrente	
46150000	Ibotirama	12°10'57"	43°13'23"	325.200	São Francisco	
46360000	Morpará	11°33'30"	43°16'57"	348.074	São Francisco	
46902000	Boqueirão	11°20'38"	43°49'42"	68.540	Grande	
48020000	Juazeiro	09°24'20"	40°30'12"	510.800	São Francisco	Submédio
49660000	Traipu	09°58'17"	37°00'17"	622.600	São Francisco	Baixo

3.1.1. Preenchimento de falhas e extensão das séries

Após a análise dos dados hidrológicos, àqueles inexistentes ou considerados inconsistentes foram atribuídas falhas para posterior preenchimento, sendo este realizado por meio de correlações, segundo critérios consagrados de escolha de bases para as regressões. Com relação a um mesmo curso d'água, iniciou-se preferencialmente pela estação mais próxima. Quando essa condição não pôde ser atendida, aplicou-se o princípio da semelhança hidrológica, tendo nos coeficientes de correlação a base para a tomada de decisão.

Para o preenchimento de falhas nas séries de vazão, utilizou-se a regressão linear simples, com base na equação 6.

$$Q_y = a + b Q_x \quad (6)$$

em que:

- Q_y = vazão do posto com falha, $m^3 s^{-1}$;
- Q_x = vazão do posto com dados, $m^3 s^{-1}$; e
- a, b = parâmetros ajustados na regressão pelo método dos mínimos quadrados, adimensional.

Para o preenchimento dos dados pluviométricos foi utilizado o método da ponderação regional com base em regressões lineares, que consiste em estabelecer regressões lineares entre o posto com dados a serem preenchidos e cada um dos postos vizinhos. De cada uma das regressões lineares efetuadas foi obtido o coeficiente de correlação, sendo o preenchimento realizado com base na seguinte equação:

$$P_Y = \frac{r_{yx1} P_{X1} + r_{yx2} P_{X2} + \dots + r_{yxz} P_{Xz}}{(r_{yx1} + r_{yx2} + \dots + r_{yxz})} \quad (7)$$

em que:

- P_y = precipitação do posto com falha, mm;
- P_x = precipitação do posto com dados, mm; e
- r_{yxj} = coeficiente de correlação entre os postos considerados, adimensional; e
- z = número total de postos vizinhos considerados.

Quando não foi possível a utilização do método da ponderação regional com base em regressões lineares, utilizou-se o método da regressão linear simples para o preenchimento de falhas de dados de precipitação.

Para a aplicação dos métodos, adotaram-se, como critério mínimo, a obtenção de coeficiente de determinação (r^2) superior a 0,7 e a existência de pelo menos 10 pares de eventos comuns entre as estações consideradas para o estabelecimento da regressão.

O preenchimento de falhas e a extensão das séries foram realizados para obtenção dos dados relativos à precipitação média anual e à vazão média anual.

3.1.2. Precipitação média anual

Na análise da distribuição espacial das precipitações anuais ao longo da bacia foi utilizado o método das isoietas, com base na equação 8.

$$P_m = \frac{\sum \left(\frac{P_i + P_{i+1}}{2} \right) A_i}{A} \quad (8)$$

em que:

P_m = precipitação média na bacia considerada, mm;

P_i = valor da isoieta de ordem i , mm;

P_{i+1} = valor da isoieta de ordem $i + 1$, mm;

A_i = área interna à bacia entre as duas isoietas de ordem i e $i+1$, km^2 ; e

A = área total da bacia, km^2 .

Para o cálculo da precipitação média nas áreas de drenagem das 23 estações fluviométricas estudadas, foi utilizado o método do Polígono de Thiessen. O cálculo foi realizado pela média ponderada entre a precipitação de cada estação e o peso a ela atribuído, que é a área de influência de P_j , ou seja:

$$P_m = \frac{\sum_{j=1}^n (P_j A_j)}{\sum_{j=1}^n A_j} \quad (9)$$

em que:

- P_j = precipitação em cada estação, mm;
- A_j = área de influência de P_j , km²; e
- n = número de estações pluviométricas consideradas.

3.1.3. Vazões médias e mínimas

Pela análise dos dados consistidos das 23 estações fluviométricas estudadas, obtiveram-se as vazões médias anuais e a vazão média anual de longa duração calculada utilizando a média das vazões médias anuais. A vazão específica média de longa duração foi obtida pela divisão dos dados de vazão média anual pela área de drenagem da estação fluviométrica considerada.

As vazões utilizadas neste estudo para a caracterização dos eventos mínimos foram a vazão mínima com sete dias de duração (Q_7), a vazão mínima com sete dias de duração e período de retorno de 10 anos ($Q_{7,10}$) e a vazão associada à permanência de 95% ($Q_{95\%}$), freqüentemente utilizados em procedimentos de outorga de uso da água.

Para a obtenção da $Q_{7,10}$ foi empregado o programa RH 3.0 (EUCYDES et al., 1999). A $Q_{95\%}$ foi obtida segundo a metodologia proposta por TUCCI (2002), a partir da análise da freqüência de ocorrência das vazões diárias, retratando a parcela de tempo que determinada vazão é igualada ou superada durante o período analisado.

Nas estações localizadas nos afluentes do São Francisco, foi realizada a regionalização das vazões média e mínima a partir do método de razão de área de drenagem (equação 10), proposto por Stendinger et al. (1992), comumente usado no cálculo de vazões regionais, visando à estimativa das vazões nas seções de deságüe das sub-bacias no rio São Francisco (CHAVES et al., 2002).

$$Q_r = \left(\frac{A_y}{A_x} \right) Q_{rp} \quad (10)$$

em que:

Q_r = vazão de referência em um ponto da bacia, $m^3 s^{-1}$;

Q_{rp} = vazão de referência em um posto fluviométrico próximo, $m^3 s^{-1}$;

A_x = área de drenagem da seção de vazão conhecida, km^2 ; e

A_y = área de drenagem da seção de interesse, a jusante da seção de vazão conhecida, km^2 .

Conhecidas a precipitação média, a vazão média anual e a área de drenagem de cada um dos afluentes estudados, calculou-se a proporção de contribuição de cada um dos afluentes. Para tanto, propuseram-se os conceitos de contribuições potencial e real, visando à identificação da proporção de contribuição de cada um dos afluentes para a formação da vazão do São Francisco.

A contribuição potencial é definida pela relação entre o volume precipitado na área de drenagem de cada afluente e o volume precipitado na área de drenagem da bacia do São Francisco, ou seja, é a contribuição que o afluente apresentaria para a formação da vazão do rio São Francisco se toda a precipitação fosse convertida em escoamento, calculada com a seguinte equação:

$$C_p = \frac{Vp_{\text{afuente}}}{Vp_{\text{bacia}}} 100 \quad (11)$$

em que:

C_p = contribuição potencial, %;

Vp_{Afluente} = volume precipitado na área de drenagem do afluente estudado, m^3 ; e

Vp_{bacia} = volume precipitado na área de drenagem da bacia, m^3 .

A contribuição real é definida pela relação entre o volume médio escoado na seção de deságüe do afluente no São Francisco e o volume médio escoado na sua foz, sendo esta representativa da contribuição que cada afluente

apresenta para a formação da vazão do São Francisco, refletindo, nesse caso, as perdas ocorridas por evapotranspiração, sendo representada pela equação seguinte:

$$C_r = \frac{Ve_{\text{afuente}}}{Ve_{\text{bacia}}} 100 \quad (12)$$

em que:

C_r = contribuição real, %;

Ve_{Afluente} = volume médio escoado na seção de deságüe do afluente no São Francisco, m^3 ; e

Ve_{bacia} = volume médio escoado na foz da bacia do São Francisco, m^3 .

Para a representação da área de drenagem da bacia do São Francisco foi utilizada a estação Traipu (estação localizada mais na foz da bacia), com uma área de drenagem de 622.600 km^2 , representando, portanto, 97,4% da área da bacia.

Na área de drenagem não abrangida pelos afluentes estudados, correspondente a 342.948 km^2 e que representa 53,7% da área da bacia do São Francisco, tanto o volume precipitado quanto o volume escoado foram obtidos pela diferença entre o valor correspondente à área de drenagem da bacia do rio, representada pela estação Traipu, e a soma dos valores de todas as sub-bacias estudadas, sendo representada pela seguinte equação:

$$Vh_{\text{ane}} = Vh_{\text{bacia}} - \sum Vh_{\text{afluentes}} \quad (13)$$

em que:

Vh_{ane} = variável hidrológica na área de drenagem não abrangida pelos afluentes estudados;

Vh_{bacia} = variável hidrológica na bacia; e

$Vh_{\text{Afluentes}}$ = variável hidrológica nos afluentes estudados.

3.1.4. Coeficiente de deságüe

O coeficiente de deságüe foi obtido pela equação 14.

$$C_d = \frac{V_{T(\text{escoado})}}{V_{T(\text{precipitado})}} \quad (14)$$

em que:

C_d = coeficiente de deságüe, adimensional;

$V_{T(\text{escoado})}$ = volume total que escoo na seção de deságüe durante o ano considerado, m^3 ; e

$V_{T(\text{precipitado})}$ = volume total que precipita na bacia de drenagem que contribui para a seção de deságüe, m^3 .

3.1.5. Análise de estacionariedade

A análise de estacionariedade foi feita considerando os períodos de 1950 a 1976 e de 1979 a 2000, que correspondem aos períodos anterior e posterior ao enchimento do reservatório de Sobradinho, bem como do expressivo crescimento econômico evidenciado na bacia do São Francisco, a fim de identificar alterações ocorridas no comportamento das vazões médias nas estações situadas a jusante do reservatório. Aplicou-se também o estudo de estacionariedade nas demais estações fluviométricas estudadas, localizadas a montante do reservatório, considerando o mesmo período.

Os testes utilizados para a verificação da identidade de variâncias e de médias foram os de Fisher e Student, respectivamente, sendo a aplicação realizada conforme a metodologia proposta por EUCLYDES et al. (1999).

A análise dos dados evidenciou um comportamento não-estacionário tanto nas estações situadas a jusante de Sobradinho quanto, também, nas várias estações situadas a montante de Sobradinho.

A não-estacionariedade evidenciada nas estações a jusante de Sobradinho confirmou a expectativa existente, sendo facilmente compreendida pelas grandes alterações ocorridas nessa região da bacia, seja pela formação do reservatório, seja também pelo grande desenvolvimento ocorrido na bacia a partir da década de 1970, sendo a irrigação, segmento com maior requerimento de água, um dos principais indutores desse desenvolvimento. Nas estações de montante, entretanto, também foi evidenciado um comportamento não-estacionário dos dois períodos mencionados anteriormente, mesmo não havendo os efeitos de regularização mencionados com relação às estações de jusante, sendo esse fato justificado pelo expressivo aumento da precipitação no segundo período analisado. Com base nessa análise, consideraram-se, no estudo do comportamento hidrológico na bacia do São Francisco, os períodos de 1950 a 1976 e de 1979 a 2000.

3.2. Procedimento de ajuste das vazões média e mínima ao longo do rio São Francisco

Tendo em vista as inconsistências comumente encontradas nas vazões média e mínima calculadas a partir de séries históricas, inclusive com reduções na magnitude dessas variáveis com o aumento da área de drenagem em situações em que esse comportamento não apresenta uma justificativa plausível, procurou-se desenvolver um procedimento para a correção dessas distorções. Para tanto, procedeu-se ao ajuste de equações de regressão das séries de dados calculados de cada estação fluviométrica individualmente.

Tal procedimento está fundamentado na idéia de que a vazão obtida pela equação de ajuste e que considera as informações de todas as estações fluviométricas situadas no rio é mais representativa que a vazão obtida pontualmente na seção considerada.

O melhor modelo de ajuste foi escolhido com base no coeficiente de determinação e pelo índice de desempenho (c), proposto por CAMARGO e

SENTELHAS (1997), o qual é definido pelo produto do índice de precisão, correspondente ao coeficiente de correlação (r), com o índice de concordância.

O índice de concordância, proposto por WILLMOTT (1981), varia entre “0 e 1”, e quanto mais próximo da unidade, melhor a exatidão do modelo em prever a variável dependente. ROBINSON e RUBBARD (1990) consideraram valores de d acima de 0,75 como satisfatórios. A equação para o cálculo do índice de concordância é:

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (E_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|E - \bar{O}| + |O - \bar{O}|)^2} \right] \quad (15)$$

em que:

- d = índice de concordância;
- E_i = valor estimado para o i-ésimo evento;
- O_i = valor observado para o i-ésimo evento; e
- \bar{O} = média dos valores observados.

CAMARGO e SENTELHAS (1997) apresentaram os valores para a interpretação do desempenho dos modelos de ajuste quanto à sua exatidão (Quadro 4).

Quadro 4 – Critérios para análise do desempenho de um modelo quanto à sua exatidão

Valor do índice de desempenho (c)	Desempenho
> 0,85	Ótimo
0,76 a 0,85	Muito bom
0,66 a 0,75	Bom
0,61 a 0,65	Mediano
0,51 a 0,60	Ruim
0,41 a 0,50	Mau
< 0,40	Péssimo

3.3. Estimativa da evaporação líquida no lago de Sobradinho

Os valores de evaporações líquidas médias mensais do reservatório de Sobradinho foram obtidos pela diferença entre a evaporação do lago, estimada por meio de modelos climatológicos, e a evapotranspiração real na área correspondente ao reservatório antes da sua construção, sendo esta calculada pela metodologia do balanço hídrico climatológico proposto por THORNTHWAITE e MATHER (1955).

Os dados climatológicos utilizados neste trabalho foram: temperatura média mensal, umidade relativa, velocidade do vento, precipitação, evaporação no tanque Classe A e insolação. No Quadro 5 estão representadas as estações utilizadas, bem como suas coordenadas geográficas (latitude, longitude e altitude) e períodos considerados na análise. No período anterior à construção do reservatório de Sobradinho, utilizaram-se as informações climatológicas fornecidas pela Agência Nacional das Águas (ANA), enquanto no período posterior as informações foram fornecidas pela Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF), referente à estação de Sobradinho, localizada próximo ao reservatório.

Quadro 5 – Estações climatológicas utilizadas no estudo

Estações	Operadora	Latitude	Longitude	Altitude (m)	Período
Cabrobó	ANA	8°18'36"	39°12'00"	341	1963-1970
					1973-1977
Floresta	ANA	8°21'36"	38°20'24"	309	1961-1970
					1973-1977
Petrolina	ANA	9°13'48"	40°18'00"	370	1963,1964
					1973-1977
Petrolândia	ANA	9°02'24"	38°11'24"	286	1961-1970
					1974
Sobradinho	CHESF	9°25'00"	40°49'60"	371	1980,1984-989
					1991,1993,1994 1996,1997,1999

Em função da grande quantidade de falhas encontradas nas séries históricas, optou-se por trabalhar apenas os anos com séries de dados completos.

As informações climatológicas, tanto nos períodos anteriores quanto posteriores à construção do reservatório de Sobradinho, encontram-se no Apêndice B.

3.3.1. Estimativa da evaporação no lago de Sobradinho

O cálculo da evaporação no reservatório de Sobradinho foi realizado pelas seguintes metodologias: tanque Classe A (ECA); modelo conceitual de relação complementar (CRLE), proposto por MORTON (1983a); modelo de LINACRE (1993); e modelo de KOHLER et al. (1955).

3.3.1.1. Tanque Classe A

A estimativa da evaporação no lago (E_L) pelo método do tanque Classe A foi feita pela seguinte equação:

$$E_L = C \text{ ECA} \quad (16)$$

em que:

C = coeficiente do tanque, adimensional; e

ECA = evaporação no tanque Classe A, mm mês⁻¹.

Os coeficientes de tanque normalmente utilizados na estimativa da evaporação em lagos são de 0,6 a 0,8. Neste trabalho, adotou-se o coeficiente 0,6, por ser o valor de uso mais comum em regiões áridas, como é o caso do reservatório de Sobradinho.

3.3.1.2. Modelo CRLE

A estimativa da evaporação no lago foi feita usando uma equação obtida da modificação da equação de Priestley e Taylor (MORTON, 1983a), feita para atender ao modelo CRLE e expressa por:

$$E_w = 13 + 1,12 \left(1 + \frac{0,66 \frac{P}{P_s}}{\Delta_p} \right)^{-1} R_{TP} \quad (17)$$

em que:

- E_w = evaporação no lago, mm mês⁻¹;
 P = pressão atmosférica na localidade considerada, mb;
 P_s = pressão atmosférica ao nível do mar, mb;
 Δ_p = declividade da curva de pressão de vapor na temperatura de equilíbrio, mb°C⁻¹; e
 R_{TP} = saldo de radiação na temperatura de equilíbrio, W m⁻².

Os valores 13 e 1,12, apresentados na equação 17, são constantes empíricas obtidas por meio de calibrações realizadas por MORTON (1983a), em diversas regiões áridas do mundo.

A relação entre a pressão atmosférica na localidade considerada e a do nível do mar foi obtida pela equação 18.

$$\frac{P}{P_s} = \left[\frac{288 - 0,0065h}{288} \right]^{5,256} \quad (18)$$

em que h é a altitude do local, m.

A declividade da curva de pressão de saturação de vapor foi calculada pela equação 19.

$$\Delta_p = 4098,17 \frac{v}{(T + 237,3)^2} \quad (19)$$

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

A pressão de saturação de vapor foi estimada com base na equação de Tetens, expressa por:

$$v = 6,11 \exp \left[\frac{17,27 T}{T + 237,3} \right] \quad (20)$$

O saldo de radiação na temperatura de equilíbrio foi obtido pela equação 21.

$$R_{TP} = 0,66 \frac{P}{P_s} f_w (T_p - T) + E_p \quad (21)$$

em que:

- E_p = evaporação potencial, mm mês⁻¹;
- 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 foi obtido pela equação 22, sendo considerado independente da velocidade do vento (MORTON, 1983a).

$$f_w = \frac{\left(\frac{P_s}{P} \right)^{0,5} f_z}{\zeta} \quad (22)$$

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.

O fator de estabilidade foi calculado pela equação 23 e baseia-se no fato de que as condições do fluxo de radiação e as condições de transferência de vapor na equação de Penman (1948) proporcionam um índice representativo do efeito da estabilidade atmosférica e da transferência de vapor.

$$\zeta = \left[\frac{0,28 \left(1 + \frac{v_D}{v} \right) + \Delta R_w}{\gamma P \left(\frac{P_s}{P} \right)^{0,5} f_z (v - v_D)} \right]^{-1} \quad (23)$$

em que v_D é a pressão de saturação de vapor na temperatura do ponto de orvalho (T_d), mb, sendo calculada pela equação 20.

A temperatura de equilíbrio (T_p) foi obtida por processo iterativo, utilizando-se as seguintes equações:

$$dT_p = \frac{\frac{R_w}{f_w} + v_D - v'_p + (T - T_p)}{v'_p - v} \quad (24)$$

$$T_p = T'_p + \delta T_p \quad (25)$$

em que:

- 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 é repetido até que o valor de δT_p seja 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, sendo dado pela seguinte equação:

$$R_w = (1 - a)G - B \quad (26)$$

em que:

a = albedo médio;

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 feita pela equação 27.

$$a = a_0 \left[S + (1 - S) \left(1 - \frac{Z}{330} \right) \right] \quad (27)$$

em que:

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

Z = ângulo zenital ao meio-dia.

No modelo de MORTON (1983a), a radiação global incidente é calculada a partir da radiação no topo da atmosfera, radiação global de céu claro e razão de insolação, sendo dada pela equação a seguir:

$$G = S G_0 (0,08 + 0,30S) (1 - S) G_E \quad (28)$$

em que:

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

G_0 = radiação solar na condição de céu claro, $W m^{-2}$; e

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

A radiação global na condição de céu claro foi calculada pela equação:

$$G_0 = G_E \tau \left[1 + \left(1 - \frac{\tau}{\tau_a} \right) (1 + a_0 \tau) \right] \quad (29)$$

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 obtida pela equação 30.

$$G_E = \left(\frac{1354}{\eta^2} \right) \left(\frac{\omega}{180} \right) \cos z \quad (30)$$

em que:

η = raio vetor do sol;

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

z = ângulo zenital médio diário.

O raio vetor do sol foi calculado pela equação a seguir:

$$\eta = 1 + \left(\frac{1}{60} \right) \text{sen} (29,5 i - 106) \quad (31)$$

em que i corresponde ao número do mês do ano.

O albedo para a condição de céu claro foi estimado pela equação 32.

$$a_0 = \frac{0,11 \left[\exp 1,08 - \left(\frac{2,16 \cos Z}{\pi + \sin Z} \right) \exp(0,012 Z) \right]}{1,473(1 - \sin Z)} \quad (32)$$

A transmitância para a condição de céu claro foi calculada pela equação:

$$\tau = \exp \left\{ -0,089 \left[\frac{P}{P_s \cos Z} \right]^{0,75} - 0,083 \left(\frac{j}{\cos Z} \right)^{0,90} - 0,0288 \left(\frac{\omega}{\cos Z} \right)^{0,60} \right\} \quad (33)$$

A fração da transmitância absorvida na condição de céu claro foi obtida pela equação 34.

$$\tau_a = \exp \left[-0,0415 \left(\frac{j}{\cos Z} \right)^{0,90} - (0,0029)^{0,5} \left(\frac{\omega'}{\cos Z} \right)^{0,3} \right] \quad (34)$$

em que:

j = coeficiente de turbidez, adimensional; e

ω' = fração da transmitância absorvida na condição de céu claro.

Os vários ângulos e funções necessários para a estimativa da radiação global ($W m^{-2}$) são calculados com as equações que se seguem:

$$\delta = 23,2 \sin(29,5i - 94) \quad (35)$$

$$\cos Z = \cos(\phi - \theta) \quad (36)$$

$$\cos \omega = 1 - \frac{\cos Z}{\cos \phi \cos \theta} \quad (37)$$

$$\cos z = \cos Z + \left[\left(\frac{180}{\pi} \right) \frac{\sin \omega}{\omega} - 1 \right] \cos \phi \cos \theta \quad (38)$$

em que θ é a declinação do sol.

As estimativas do vapor de água precipitável e os coeficientes de turbidez foram obtidos por:

$$\omega' = \frac{v_D}{0,49 + \frac{T}{129}} \quad (39)$$

$$j = [0,5 + 2,5 \cos^2 z] \exp [21 - T (P/P_s - 1)] \quad (40)$$

A perda de radiação de ondas longas foi calculada pela equação a seguir:

$$B = 5,5 \cdot 10^{-8} (T + 273)^4 \left[1 - \left(0,71 + 0,007 v_D \frac{P}{P_s} \right) (1 + \rho) \right] \quad (41)$$

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

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

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

A evaporação potencial foi calculada pela equação:

$$E_p = R_w - \lambda f_w (T_p - T) \quad (43)$$

em que λ é o coeficiente de transferência de calor.

O coeficiente de transferência de calor foi calculado pela equação:

$$\lambda = 0,66 \frac{P}{P_s} + \frac{22,0 \cdot 10^{-8} (T + 273)^3}{f_w} \quad (44)$$

3.3.1.3. Modelo Linacre

Para a estimativa da evaporação da água em lagos (mm mês^{-1}) quando os dados de temperatura média, precipitação e velocidade do vento são conhecidos, LINACRE (1993) propôs a seguinte equação:

$$E_L = (0,015 + 0,00042 T + 10^{-6} h) [0,8 R_s - 40 + 2,5 F u_2 (T - T_d)] \quad (45)$$

em que:

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

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

u_2 = velocidade média do vento a 2 m de altura, m s^{-1} .

O valor de R_s foi calculado tendo por base os dados de chuva. Esse cálculo baseia-se no princípio de que as nuvens interferem na transmitância da radiação solar extraterrestre (atenuação da radiação extraterrestre) e, por conseguinte, na irradiância solar à superfície. Assim, R_s é calculada com o uso da equação 46.

$$R_s = R_a (0,85 - 0,047 C_m) \quad (46)$$

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.

O valor de C_m foi calculado em função da precipitação média mensal (P_m), em mm, utilizando a equação:

$$C = 1 + 0,51 \log(P_m) + [\log(P_m)]^2 \quad (47)$$

O fator de correção devido à altitude do local é dado pela equação:

$$F = 1,0 - 0,000087h \quad (48)$$

3.3.1.4. Modelo Kohler et al.

Para a estimativa da evaporação em lagos ($mm\ mês^{-1}$) pelo modelo proposto por KOHLER et al. (1955), foi utilizada a equação 49.

$$E_L = 0,7 \left(\frac{\Delta R_n}{\Delta + \gamma_L} + \frac{\gamma_L E_a}{\Delta + \gamma_L} \right) \quad (49)$$

em que:

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

R_n = saldo de radiação, em equivalente de lâmina de água evaporada, $mm\ dia^{-1}$.

O coeficiente psicrométrico corrigido, obtido a partir do termo $[\gamma + 4 \epsilon \sigma T_a^3 / f(u)]$ da equação 3, foi calculado pela equação 50.

$$\gamma_L = 0,000661P \quad (50)$$

O poder evaporante do ar foi calculado em função da velocidade do vento e do déficit de pressão de vapor, utilizando a equação 51.

$$E_a = 7,518(0,37 + 0,00255U)(e_s - e_a)^{0,88} \quad (51)$$

A expressão ΔR_n , que representa o saldo de radiação, foi calculada pela equação:

$$\Delta R_n = 154,4 \exp[(1,8T - 180)(0,1024 - 0,0106 \ln(0,239R_s))] - 0,01544 \quad (52)$$

3.3.2. Estimativa da evapotranspiração real na área do reservatório de Sobradinho antes da sua construção

Para a estimativa da evapotranspiração real relativa ao período anterior à construção do reservatório de Sobradinho foi utilizado o método do balanço hídrico climatológico proposto por THORNTHWAITE e MATHER (1955).

Partindo do suprimento natural de água no solo representado pela precipitação e da demanda atmosférica representada pela evapotranspiração potencial, o balanço hídrico climatológico fornece estimativas da evapotranspiração real, da deficiência, do excedente e do armazenamento de água no solo.

Foi utilizada, para a aplicação da metodologia do balanço hídrico climatológico, uma rotina computacional desenvolvida no Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa (DEA-UFV), bastando para tal o fornecimento da precipitação e da evapotranspiração potencial mensal.

A estimativa da evapotranspiração potencial, parâmetro de entrada no modelo, foi baseada na metodologia proposta por Penman-Monteith, contida na publicação da FAO 56 (ALLEN et al., 1998), utilizando-se, para tanto, o programa Reference Evapotranspiration Calculator – REF ET (ALLEN, 2000).

3.3.3. Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade realizada nos modelos CRLE, Linacre e Kohler et al. foi conduzida para obtenção dos parâmetros de entrada dos modelos, como: precipitação (P), temperatura média (T), velocidade do vento (u) e insolação (n), variando-os, individualmente, enquanto os outros eram mantidos constantes. A análise de sensibilidade quantifica o efeito que as mudanças, nas variáveis de entrada, exercem na evaporação média anual no reservatório de Sobradinho.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Comportamento das variáveis hidrológicas no rio São Francisco e seus principais afluentes

4.1.1. Precipitação média anual

Na Figura 6 apresenta-se, para a bacia do São Francisco, a distribuição da precipitação média anual considerando os períodos de 1950 a 1976 e de 1979 a 1999. A precipitação média nesses períodos foi maior na região de cabeceira, decrescendo em direção à foz até as proximidades do limite entre o Submédio e o Baixo São Francisco, a partir daí ocorrendo um acentuado aumento da precipitação, em decorrência da influência oceânica no regime pluviométrico.

As precipitações observadas variaram de 390 a 1.710 mm no primeiro período analisado e de 370 a 1.800 mm no segundo. No Alto e Médio São Francisco foi constatado, em geral, aumento das precipitações médias anuais do primeiro para o segundo período, principalmente na área situada na margem esquerda do rio. No Submédio e Baixo, o comportamento foi oposto, sendo a precipitação no segundo período, em geral, um pouco inferior à do primeiro.

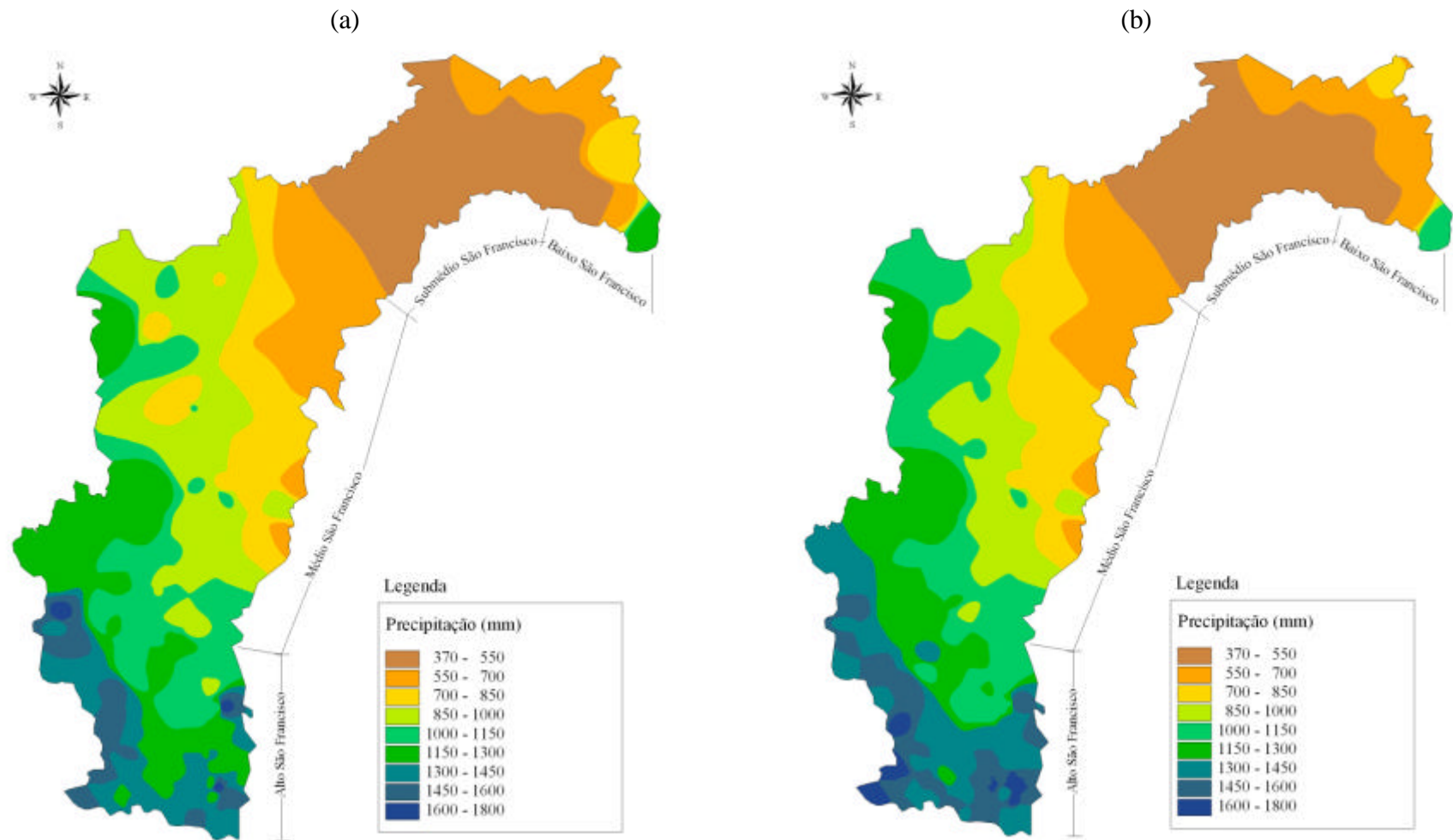


Figura 6 – Precipitação média anual na bacia do São Francisco, considerando-se os períodos de 1950 a 1976 (a) e de 1979 a 1999 (b).

Na Figura 7 estão plotadas, em ambos os períodos analisados, as precipitações médias em função da área de drenagem das 12 estações fluviométricas localizadas ao longo do rio São Francisco, bem como as equações ajustadas da precipitação em função da área de drenagem. Nos dois períodos analisados, verificou-se redução da precipitação média da nascente para a foz, sendo no segundo período a precipitação nas áreas de drenagem estudadas maior que a do primeiro, com diferença mais expressiva na região de cabeceira e diminuindo com a aproximação da foz.

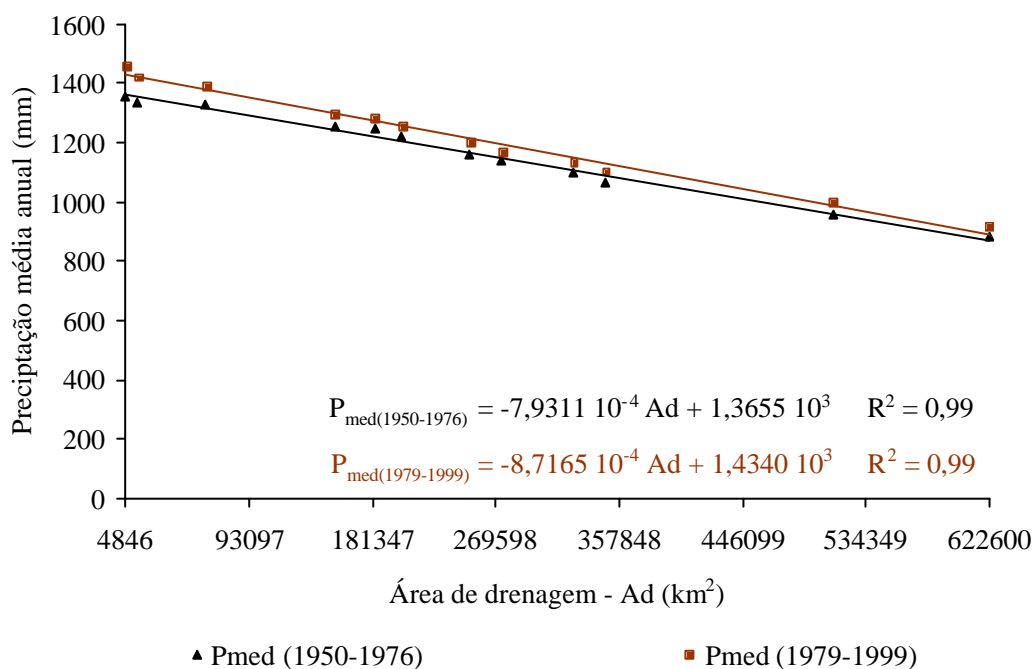


Figura 7 – Precipitação média anual nas áreas de drenagem das estações estudadas ao longo do rio São Francisco, considerando-se os períodos de 1950 a 1976 e de 1979 a 1999.

Mesmo tendo sido evidenciado um pequeno decréscimo da precipitação média no segundo período analisado no Submédio e no Baixo São Francisco (Figura 6), houve aumento das precipitações médias nas áreas de drenagem das estações localizadas próximas da foz. A esse fato está associado o aumento da precipitação no Alto e Médio São Francisco, resultando, conseqüentemente, em incremento mais expressivo da precipitação nas áreas de drenagem da região de cabeceira (5%) e, em menor proporção, nas áreas de drenagem localizadas mais

próximas da foz (2%). A taxa de decréscimo da precipitação de 1979 a 1999 foi maior que a no período de 1950 a 1976, sendo ambas de $8,72 \cdot 10^{-4} \text{ mm km}^{-2}$ e $7,93 \cdot 10^{-4} \text{ mm km}^{-2}$, respectivamente.

Na Figura 8 são representadas as precipitações médias anuais nas áreas de drenagem dos principais afluentes do São Francisco, bem como a precipitação média na bacia, representada pela estação Traipu. Apenas a sub-bacia do Verde Grande e a área não abrangida pelos afluentes estudados apresentaram precipitações menores que a evidenciada na estação Traipu. A precipitação média no segundo período foi sempre maior que a do primeiro, sendo a máxima variação na sub-bacia do rio Corrente (14,4%) e a mínima na do Paracatu (0,5%).

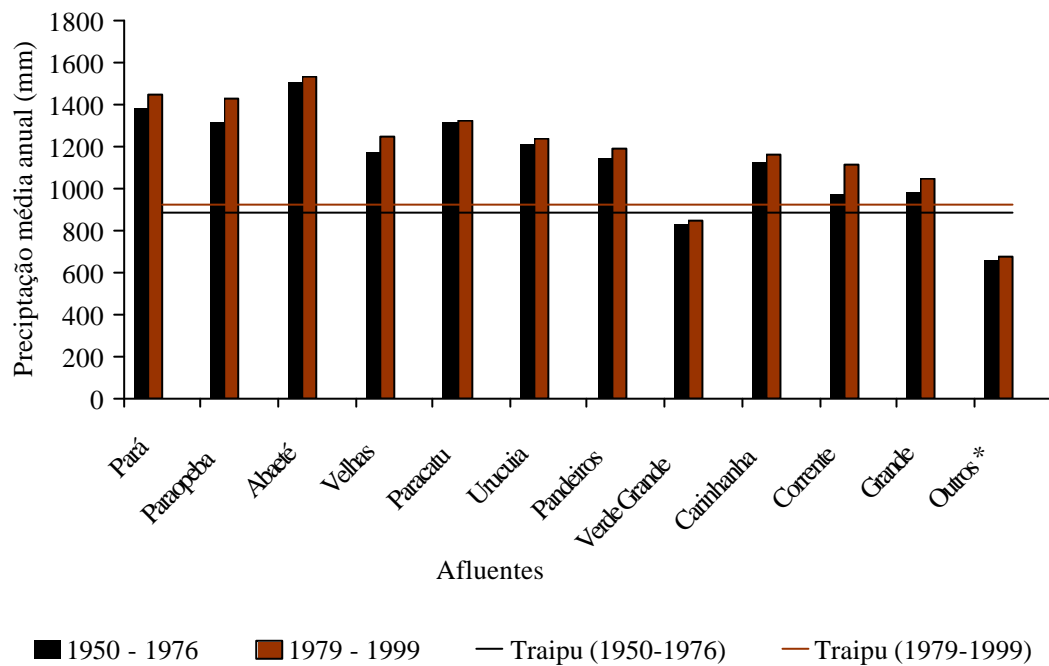


Figura 8 – Precipitação média anual nas áreas de drenagem dos principais afluentes e na área de drenagem da bacia do São Francisco, representada pela estação Traipu, considerando-se os períodos de 1950 a 1976 e de 1979 a 1999.

Na análise da contribuição potencial de cada um dos afluentes estudados (Figura 9), evidencia-se que as maiores proporções de contribuição são as dos rios Grande e Paracatu. Embora não sejam as sub-bacias com as maiores

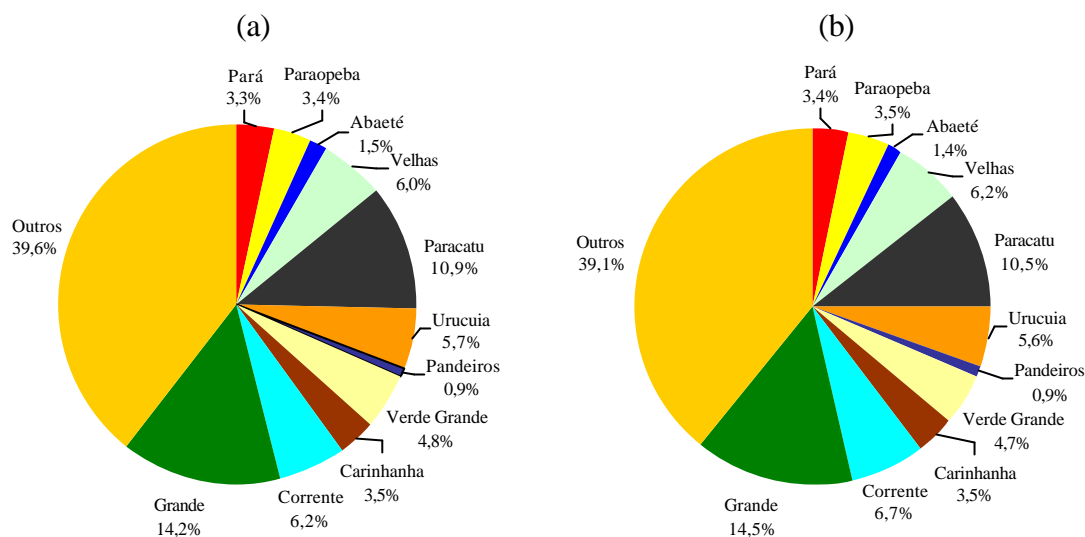


Figura 9 – Proporção da contribuição potencial dos principais afluentes para com o rio São Francisco, considerando-se os períodos de 1950 a 1976 (a) e de 1979 a 1999 (b).

precipitações médias, são as que apresentam as maiores áreas de drenagem, com 78.491 km² e 45.203 km², respectivamente, fazendo com que os volumes precipitados nessas áreas sejam de maior magnitude.

Considerando o período de 1950 a 1976, verificou-se que a sub-bacia do rio Grande, que representa 12,6% da área de drenagem da bacia do São Francisco (Figura 5), apresenta a maior contribuição potencial (14,2%), sendo a precipitação média nesta sub-bacia 12,5% superior à da bacia (Figura 8).

Na sub-bacia do Paracatu, que apresenta a segunda maior contribuição potencial (10,9%), observa-se que sua área de drenagem representa apenas 7,3% da área da bacia do São Francisco, mas apresenta uma precipitação média superior à da bacia em 46,4%. Em relação à sub-bacia do Grande, a sub-bacia do Paracatu apresenta uma área equivalente a 57,6%, sendo a contribuição potencial, entretanto, da ordem de 77,0% daquela do rio Grande.

Para com a sub-bacia do rio Verde Grande, cuja área representa 5,0% da área da bacia do rio São Francisco, a contribuição potencial é de 4,8%, tendo em vista o fato de a precipitação nessa sub-bacia ser menor que a precipitação média na bacia do São Francisco. Esse comportamento também foi constatado na área

não abrangida pelos afluentes estudados, que representa 53,7% da área da bacia e uma contribuição potencial da ordem de 39,6%.

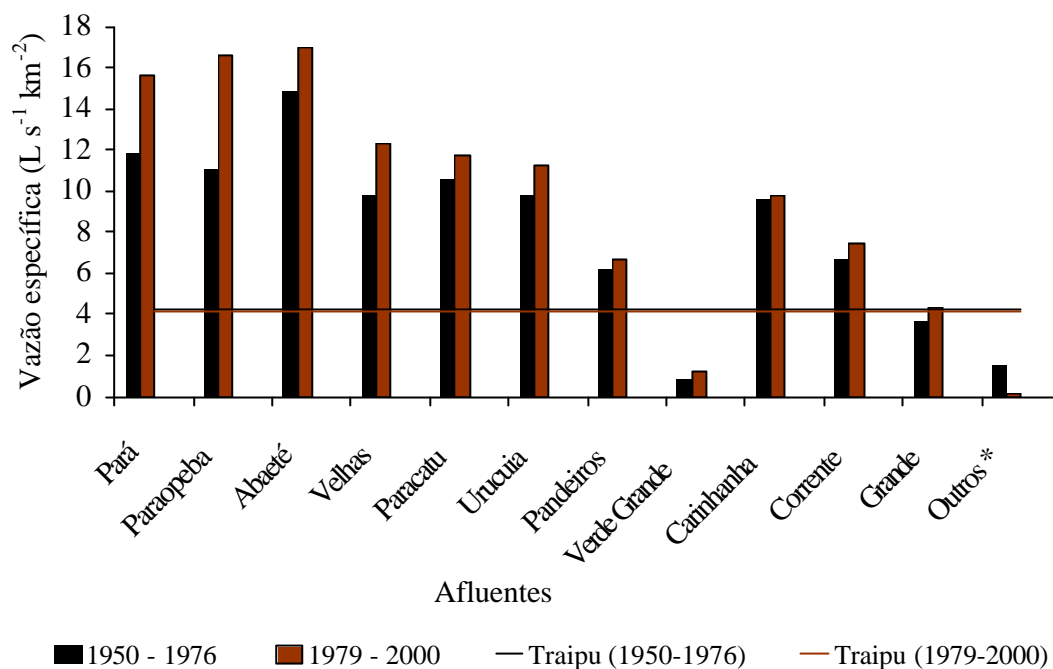
Considerando o período de 1979 a 1999, verifica-se que as variações nas proporções das contribuições potenciais, em relação ao primeiro período, foram muito pequenas e estão diretamente relacionadas com as mudanças nas precipitações das diversas sub-bacias. Nas sub-bacias dos rios Paracatu, Urucuaia, Verde Grande e da área não abrangida pelas sub-bacias estudadas, apesar de as precipitações também terem sido mais altas no segundo período, o aumento foi menor que o ocorrido na precipitação média da bacia, o que acarretou, portanto, decréscimo na proporção da contribuição potencial.

4.1.2. Vazões médias anuais

Na Figura 10 são apresentadas as vazões específicas médias de longa duração nos principais afluentes do rio São Francisco, bem como no próprio rio principal. As vazões específicas mais altas foram encontradas nas regiões de cabeceira da bacia, o que decorre das maiores precipitações evidenciadas nessas áreas.

As únicas sub-bacias que apresentaram vazões específicas expressivamente menores que a vazão específica média evidenciada na bacia foram a do Verde Grande e aquelas correspondentes à área não abrangida pelos afluentes estudados, sendo estas as únicas regiões com precipitações médias nas suas áreas de drenagem inferiores à média evidenciada na bacia.

Na sub-bacia do Verde Grande, apesar de a precipitação ter sido inferior à precipitação média na bacia do São Francisco em apenas 5,7% no período de 1950 a 1976 e 7,6% no período de 1979 a 2000 (Figura 8), a redução da vazão específica em relação à média da bacia foi da ordem de 80,5 e 69,2%, respectivamente. Tal fato pode ser compreendido pela análise do próprio processo de formação das vazões, o qual se processa da seguinte forma: do volume total precipitado, parte é interceptada pela vegetação, enquanto o restante



(*) Expressa a contribuição da área de drenagem não abrangida pelos afluentes estudados e o efeito das ações antrópicas

Figura 10 – Vazão específica média de longa duração nos principais afluentes e no rio São Francisco, representado pela estação Traipu, considerando-se os períodos de 1950 a 1976 e de 1979 a 2000.

atinge a superfície do solo. Da precipitação que atinge o solo, parte infiltra e parte escoar sobre a superfície. Enquanto a intensidade de precipitação é menor que a capacidade de infiltração, toda a quantidade precipitada infiltra. O escoamento sobre a superfície do solo somente começa quando a intensidade de precipitação supera a capacidade de infiltração, ressaltando-se que a parcela inicial desse escoamento irá preencher as depressões existentes na superfície, constituindo o armazenamento superficial. Da parte que escoar sobre a superfície, uma alta proporção irá sair da bacia pelo escoamento na sua seção de deságüe, aumentando, conseqüentemente, o coeficiente de deságüe. Da parte da precipitação que infiltra no solo, a menor parcela é convertida em escoamento na seção de deságüe, tendo em vista que uma alta proporção da lâmina infiltrada é convertida em evapotranspiração, sendo esta apenas a lâmina que percola em profundidade transformada em escoamento subterrâneo.

Quanto menor a umidade do solo no momento da ocorrência da precipitação, tanto maior será a lâmina infiltrada e, conseqüentemente, a

quantidade de água mantida na camada superficial do solo, a qual será transformada, em boa parte, em evapotranspiração. Conseqüentemente, menor será a quantidade de água que percolará em profundidade, bem como menor também será a parcela da precipitação convertida em escoamento na seção de deságüe dos cursos d'água.

Tendo em vista ser a precipitação média anual na sub-bacia do rio Verde Grande correspondente a 830 mm no período de 1950 a 1976, muito inferior à evapotranspiração potencial, ocorre um déficit de água no solo muito grande, fazendo com que a maior parcela do total precipitado seja retida na camada superficial do solo. Essa água, retida na camada explorada pelo sistema radicular das culturas, é posteriormente evapotranspirada, reduzindo a parcela da precipitação convertida em escoamento no rio. Comparando o comportamento observado no período de 1979 a 2000 com o do período de 1950 a 1976, observou-se que, embora o aumento da precipitação fosse de apenas 2,3%, o incremento do volume escoado foi de 53,7%, ou seja, passou de $0,82 \text{ L s}^{-1} \text{ km}^{-2}$, relativo ao primeiro período, para $1,26 \text{ L s}^{-1} \text{ km}^{-2}$, referente ao segundo.

Mesmo com a intensificação do uso da água pela irrigação na sub-bacia do Verde Grande, ocasionando inclusive a intermitência dos principais cursos d'água da região (ANA, 2002), não se constatou esse efeito na vazão média de longa duração, visto que no período de 1979 a 2000 (período de maior crescimento econômico na sub-bacia) foi observado aumento da vazão específica. RODRIGUEZ (2004) também constatou que, apesar de a irrigação ter sido a maior responsável pela vazão consumida na sub-bacia do Paracatu, sendo responsável por até 93% do total consumido, a relação com a vazão média de longa duração apresentou pouca influência, sendo a maior percentagem dessa relação da ordem de 2,1%.

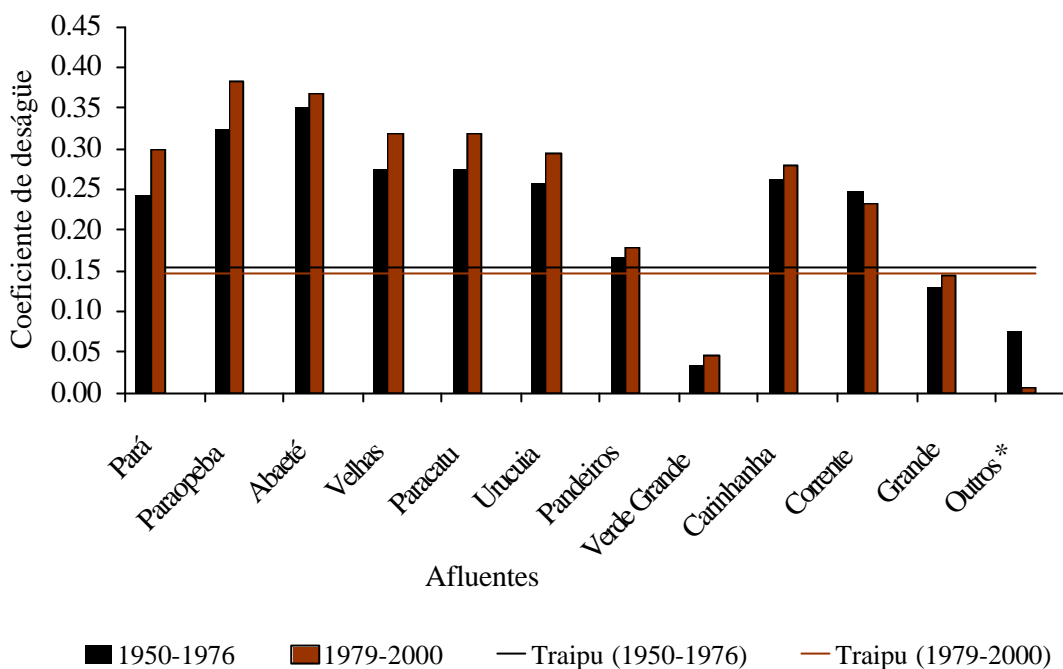
Comportamento similar ao evidenciado no Verde Grande foi também constatado no período de 1950 a 1976, na área não abrangida pelos afluentes estudados, que representa 53,7% da área da bacia do São Francisco, e onde a precipitação média também é muito inferior à evapotranspiração potencial. Com relação ao período de 1979 a 2000, verificou-se que a vazão específica foi menor

que a do primeiro período estudado. Tal fato pode ser entendido pelo motivo de que a construção e enchimento dos reservatórios de acumulação (Sobradinho, Itaparica/Luiz Gonzaga, Moxotó, Paulo Afonso e Xingó) acarretou expressiva evaporação dos reservatórios, o que ocasionou, portanto, a redução da vazão específica, uma vez que a vazão média de longa duração dessas áreas foi quantificada pela diferença entre a vazão de Traipu e a soma das vazões correspondentes a todas as sub-bacias estudadas.

As maiores vazões específicas foram observadas na região do Alto São Francisco, as quais podem ser justificadas pelos fatos de as precipitações serem as mais elevadas na bacia, chegando a atingir valores da ordem de 1.800 mm; de as evapotranspirações potenciais serem as mais baixas na bacia; e da alta urbanização e impermeabilização destas sub-bacias, tendo em vista a presença da região metropolitana de Belo Horizonte, nas sub-bacias dos rios das Velhas e Paraopeba.

Analisando-se as diferenças ocorridas entre os períodos de 1950 a 1976 e de 1979 a 2000 nas sub-bacias localizadas no Alto São Francisco, o incremento na precipitação média no segundo período resultou, em relação ao primeiro, em um grande aumento na vazão específica média de longa duração, comportamento que pode ser explicado pelo fato de que, sendo as precipitações médias nessas sub-bacias já elevadas em relação às das outras sub-bacias, o solo permanece com umidade também mais elevada durante grande parte do ano, com o que, por ocasião da ocorrência das precipitações, maior parcela destas é convertida, seja em escoamento superficial, seja em escoamento subterrâneo, com a ressalva de que ambos irão acarretar aumento na vazão específica média. Esse fato também está relacionado à impermeabilização devida à intensa urbanização evidenciada nessas sub-bacias.

Comportamento similar ao da vazão específica média de longa duração também pode ser evidenciado no coeficiente de deságüe (Figura 11), cujo crescimento, com o aumento do total precipitado, está diretamente associado ao fato de que, com o aumento do total precipitado, menor parcela deste será



(*) Expressa a contribuição da área de drenagem não abrangida pelos afluentes estudados e o efeito das ações antrópicas

Figura 11 – Coeficiente de deságüe nos principais afluentes e no rio principal, representado pela estação Traipu, considerando-se os períodos de 1950 a 1976 e de 1979 a 2000.

convertida em evapotranspiração, acarretando maior proporção da precipitação convertida em escoamento no rio.

Analisando a sub-bacia do Verde Grande, que apresenta o menor coeficiente de deságüe entre as sub-bacias estudadas, observou-se, no período de 1950 a 1976, que do volume total precipitado apenas 3% atingiam a sua foz, desaguando no rio São Francisco, com o que 97% do total precipitado é convertido, basicamente, em evapotranspiração. No período de 1979 a 2000, notou-se que o aumento do total precipitado acarretou também aumento da proporção do volume escoado (5%), confirmando o comportamento discutido anteriormente.

Dentre os afluentes estudados, apenas na sub-bacia do rio Corrente foi observado um decaimento do coeficiente de deságüe no segundo período em relação ao primeiro, sendo este decorrente do fato de o aumento evidenciado no volume precipitado ter sido maior que o constatado no volume escoado, fato para o qual não se encontrou uma explicação aceitável.

Nas sub-bacias do Alto São Francisco, encontram-se os maiores valores do coeficiente de deságüe, sendo estes de 0,35 no primeiro período (sub-bacia do rio Abaeté) e de 0,38 no segundo (sub-bacia do rio Paraopeba), comportamento esse decorrente das maiores precipitações evidenciadas nessas áreas e da impermeabilização, no caso do Paraopeba.

Na Figura 12 são apresentadas as proporções da contribuição real dos principais afluentes do rio São Francisco para a formação da sua vazão, considerando-se os períodos de 1950 a 1976 e de 1979 a 2000. Analisando o primeiro período (Figura 12a), que representa uma condição sem a influência dos reservatórios de regularização e, ainda, um pequeno efeito do desenvolvimento econômico, intensificado a partir da década de 1970 na bacia (ONS, 2004), evidenciou-se que a sub-bacia com maior proporção de contribuição real para a formação da vazão do rio São Francisco foi a do Paracatu (18,2%), sendo essa bastante superior à proporção da contribuição potencial correspondente a esta sub-bacia (10,9%). Já a sub-bacia do rio Grande, embora fosse a de maior contribuição potencial (14,2%), foi a que apresentou a segunda maior contribuição real (10,9%), ou seja, muito próxima à da sub-bacia do rio das Velhas (10,5%), com uma área de drenagem ainda menor.

O comportamento correspondente às sub-bacias dos rios Grande ($A_d = 78.491 \text{ km}^2$) e Paracatu ($A_d = 45.203 \text{ km}^2$) pode ser compreendido pela análise do volume total anual precipitado nas áreas de drenagem dessas sub-bacias e pela magnitude da evapotranspiração potencial nessas áreas. Observou-se na sub-bacia do rio Grande a ocorrência de precipitações médias anuais mais baixas (982 mm) em relação às da sub-bacia do Paracatu (1.313 mm), além de evapotranspirações potenciais na sub-bacia do rio Grande superiores às do Paracatu. Portanto, o maior déficit evapotranspirométrico na sub-bacia do rio Grande contribui para uma menor conversão da precipitação ocorrida na sub-bacia para a formação da vazão do rio São Francisco.

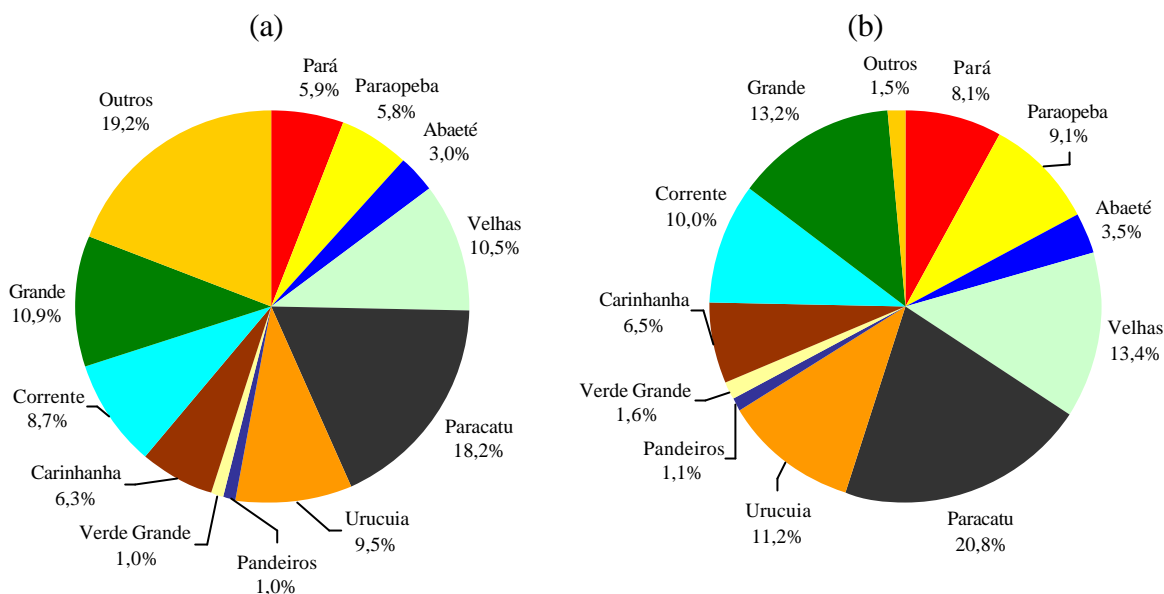


Figura 12 – Proporção da contribuição real dos principais afluentes para com o rio São Francisco, considerando-se os períodos de 1950 a 1976 (a) e de 1979 a 2000 (b).

Comparando as sub-bacias dos rios Verde Grande e Pandeiros, evidenciou-se também a influência da precipitação média nas áreas de drenagem dessas sub-bacias, bem como da evapotranspiração potencial, tendo em vista que ambas apresentaram proporções de contribuição real iguais (1,0%), entretanto a sub-bacia do Verde Grande apresenta uma área de drenagem de cerca de sete vezes maior que a do Pandeiros, sendo a precipitação total anual correspondente a essas áreas de 830 mm e 1.140 mm, respectivamente, e evapotranspirações potenciais na sub-bacia do Verde Grande superiores às do Pandeiros.

O efeito das baixas precipitações e altas evapotranspirações potenciais na formação da vazão do São Francisco foi ainda mais evidente na área de drenagem não abrangida pelos afluentes estudados, uma vez que essa área apresentava uma contribuição real de apenas 19,2%, quando a contribuição potencial era de 39,6% e a proporção dessa área em relação à bacia, de 53,7%.

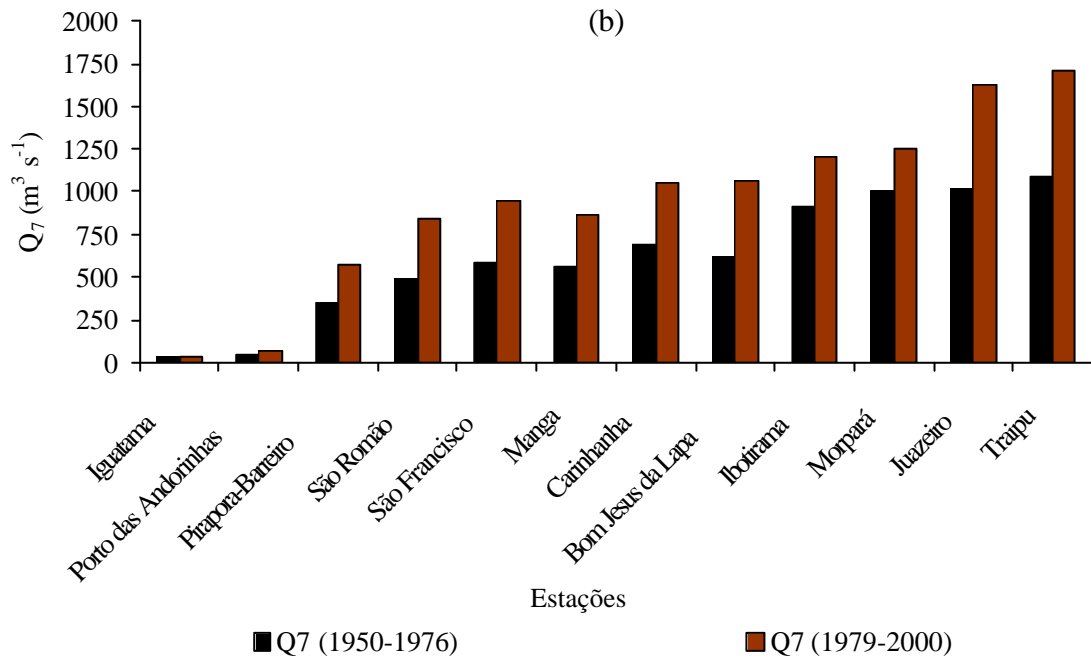
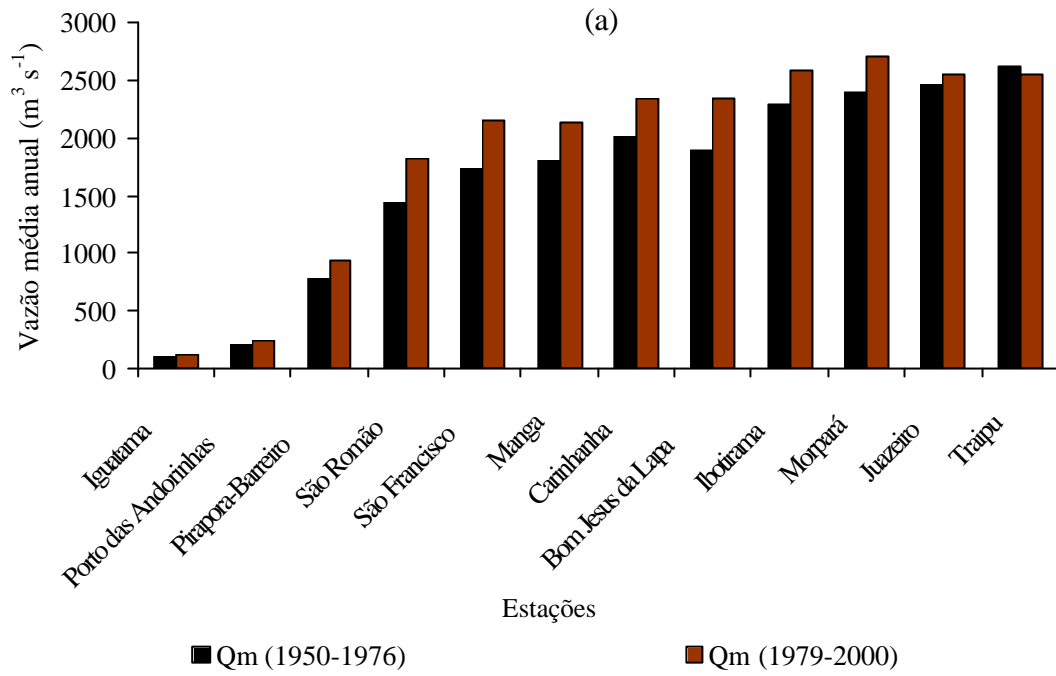
Analisando o período de 1979 a 2000 (Figura 12b), observou-se crescimento na contribuição real em todas as sub-bacias estudadas em relação ao primeiro período, sendo esse crescimento em média de 22,3%, exceto na área não abrangida pelos afluentes estudados, a qual apresentou uma redução do primeiro

para o segundo período de 19,2 para 1,5%. Tal comportamento pode ser explicado pelo fato de a evaporação ter aumentado em virtude da construção dos reservatórios de acumulação ocorridos após o ano de 1976, fazendo com que maior parcela do volume precipitado fosse convertida em evaporação.

Na Figura 13 estão apresentadas as vazões médias e mínimas com sete dias de duração (Q_7) nas 12 estações fluviométricas estudadas ao longo do rio São Francisco, considerando-se os períodos de 1950 a 1976 e de 1979 a 2000.

Reduções expressivas de vazões com o aumento da área de drenagem em locais em que não se encontrou uma justificativa plausível para esse comportamento podem ser observadas, de forma mais expressiva, nas estações Carinhanha e Bom Jesus da Lapa, onde ocorreu, em relação à vazão média no período de 1950 a 1976, uma diminuição da ordem de $112 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, sendo o acréscimo na área de drenagem de 9,0%. Tal fato também pôde ser evidenciado com relação à Q_7 , sendo a redução da ordem de $76 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

O fato de as vazões estudadas ao longo do rio São Francisco apresentarem as inconsistências mencionadas conduziu ao desenvolvimento de um procedimento, cujos resultados são apresentados na seqüência, visando à obtenção de equações de ajuste da vazão em função da área de drenagem e que reflitam a tendência de comportamento geral da bacia de uma forma mais próxima da tendência de comportamento esperado. Com esse procedimento, as vazões em cada seção do rio passaram a considerar as informações correspondentes às diversas estações localizadas ao longo do rio e não apenas as informações da estação em análise.



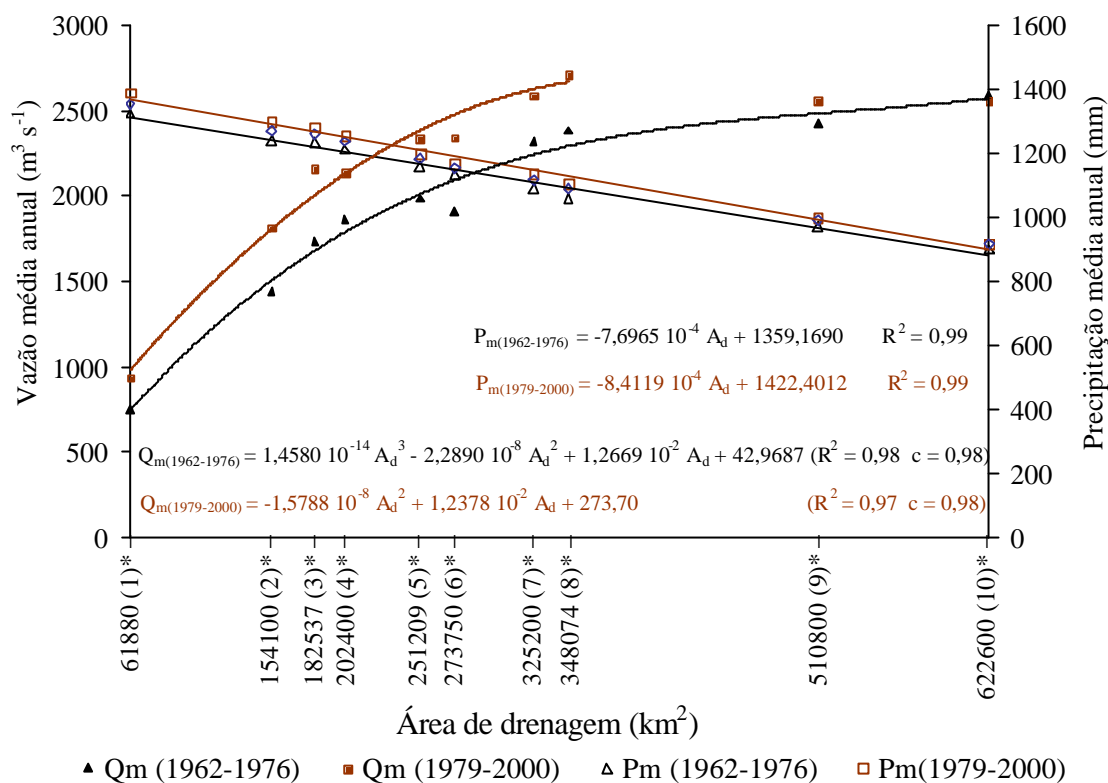
4.2. Procedimento de ajuste das vazões média e mínima ao longo do rio São Francisco

Para análise do comportamento das vazões média e mínima ao longo do rio São Francisco foram consideradas somente as estações situadas a jusante do reservatório de Três Marias (localizado no Alto São Francisco), e excluído da análise o período de 1950 a 1961, tendo em vista que a operação do reservatório foi iniciada em 1962. No período considerado, todas as estações estudadas apresentavam a mesma influência do reservatório nas vazões analisadas. No Apêndice C, encontram-se todas as variáveis hidrológicas estudadas.

4.2.1. Vazão média anual ao longo do rio São Francisco

Na Figura 14 estão apresentadas as vazões e precipitações médias anuais das estações fluviométricas consideradas ao longo do rio São Francisco, bem como as equações ajustadas da vazão média em função da área de drenagem, considerando-se os períodos de 1962 a 1976 e de 1979 a 2000. Houve uma interrupção do ajuste realizado no segundo período a partir da estação Morpará, decorrente da construção dos reservatórios de Sobradinho, Itaparica/Luiz Gonzaga, Moxotó, Paulo Afonso e Xingó ao longo desse trecho da bacia, o que diminuiu a vazão média, decorrente da evaporação ocorrida nos reservatórios e do aumento da vazão mínima advindo do efeito de regularização dos reservatórios.

Os comportamentos obtidos pelas equações ajustadas das vazões médias anuais nos períodos analisados resultaram em um coeficiente de determinação da ordem de 0,98 no primeiro período e 0,97 no segundo, sendo as equações ajustadas do tipo polinomial cúbica e quadrática, respectivamente, e o índice de desempenho desses modelos classificados como ótimos por CAMARGO e SENTELHA (1997).



*Identificador/Estação: 1/Pirapora-Barreiro, 2/São Romão, 3/São Francisco, 4/Manga, 5/Carinhanha, 6/Bom Jesus da Lapa, 7/Ibotirama, 8/Morpará, 9/Juazeiro e 10/Traipu

Figura 14 – Variação da vazão média e da precipitação média anual ao longo do rio São Francisco, em função da área de drenagem, considerando-se os períodos de 1962 a 1976 e de 1979 a 2000.

As variações ocorridas no comportamento das vazões médias estimadas pelas equações ajustadas em relação às observadas no período de 1962 a 1976 tiveram as maiores diferenças nas estações Bom Jesus da Lapa (9,6%) e Manga (4,0%), com super e subestimativas, respectivamente. A vazão média estimada em Bom Jesus da Lapa foi de $2.095 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e a observada, de $1.911 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, enquanto na estação Manga a vazão estimada foi de $1.790 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e a observada, de $1.864 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. No período de 1979 a 2000, as variações tenderam a ser menores que as constatadas no primeiro período, sendo as máximas de 5,7% na estação Bom Jesus da Lapa e de 7,1% na estação São Francisco, com vazões estimadas de $2.479 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e $2.007 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e observadas de $2.344 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e $2.160 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, respectivamente.

Na comparação dos resultados obtidos entre os períodos de 1962 a 1976 e de 1979 a 2000, verificou-se aumento da vazão média anual de longa duração

até a seção de montante do reservatório de Sobradinho (8). Com relação ao trecho a jusante desse reservatório, observou-se que, mesmo tendo sido constatado aumento da precipitação, a vazão média teve pequeno crescimento na estação Juazeiro e redução na Traipu.

Em ambos os períodos estudados, evidenciou-se maior taxa de crescimento da vazão média nas posições mais a montante da bacia, comportamento esse explicado pela própria tendência da precipitação média, que também apresentou os maiores valores na região de cabeceira. Observou-se também que o desempenho obtido pela equação ajustada no segundo período era sempre maior que o do primeiro, decorrente do aumento da precipitação média nesse período.

A menor vazão específica média de longa duração no período de 1962 a 1976 ocorreu na estação mais a jusante da bacia (Traipu), com valor igual a $4,1 \text{ L s}^{-1} \text{ km}^{-2}$, enquanto a maior vazão específica foi identificada na estação mais a montante (Pirapora-Barreiro), $12,2 \text{ L s}^{-1} \text{ km}^{-2}$.

No período de 1979 a 2000, as vazões específicas foram maiores que as observadas no primeiro período, em razão do próprio aumento da precipitação. Nas duas últimas estações houve tendência de comportamento diferenciado, sendo em Juazeiro o aumento pequeno, e em Traipu até houve queda na vazão, sendo isso decorrente dos reservatórios existentes na região e do crescimento econômico na bacia. Nesse período, as vazões específicas variaram de $15,8 \text{ L s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ na estação mais a montante (Pirapora-Barreiro) a $4,0 \text{ L s}^{-1} \text{ km}^{-2}$ na estação mais a jusante (Traipu), sendo constatados, portanto, no primeiro período acréscimo da vazão específica de 31,8% em Pirapora-Barreiro e redução de 0,7% em Traipu.

Comparando a vazão média observada em Traipu com a da estação Morpará no período de 1979 a 2000, constatou-se que o expressivo impacto das ações desenvolvidas nesse trecho da bacia proporcionou uma pequena contribuição para o aumento da vazão média. Mesmo com um expressivo crescimento da área de drenagem de Traipu em relação à de Morpará

(crescimento de 78,9% na área de drenagem), evidenciou-se um declínio da vazão de $2.669 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (Morpará) para $2.558 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (Traipu).

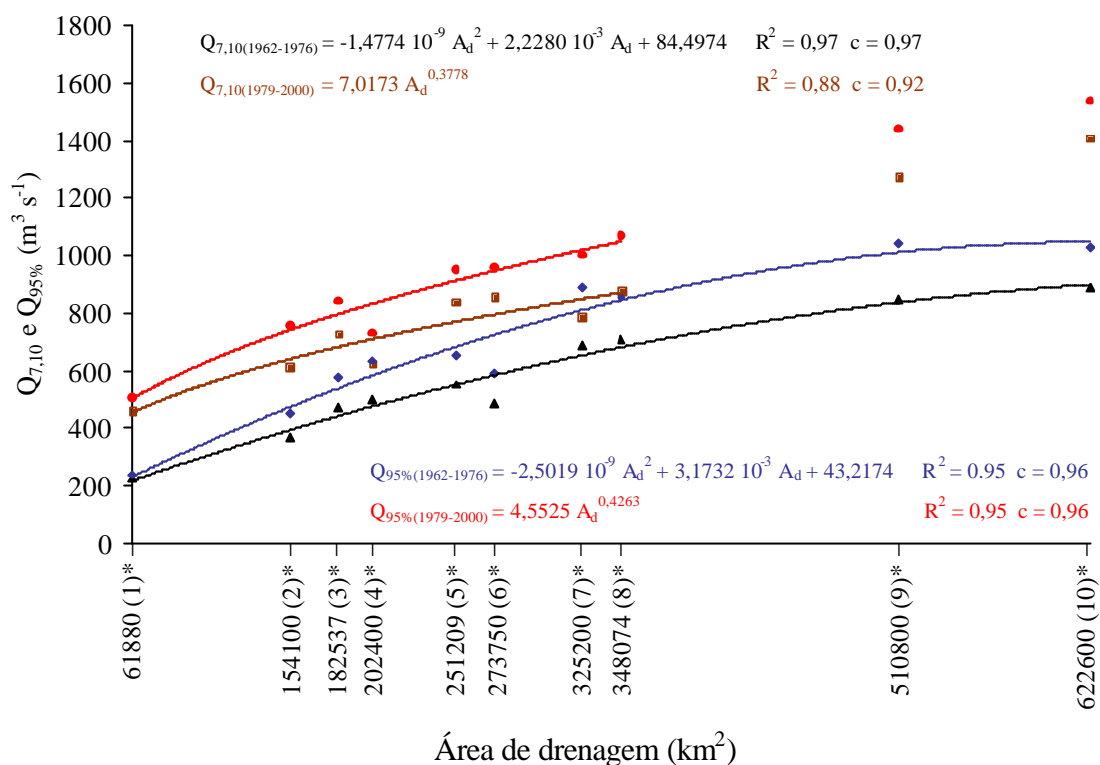
4.2.2. Vazão mínima ao longo do rio São Francisco

As vazões utilizadas para a caracterização de eventos mínimos foram as vazões mínimas com sete dias de duração e período de retorno de 10 anos ($Q_{7,10}$) e a vazão associada à permanência de 95% ($Q_{95\%}$), freqüentemente empregadas em estudos voltados para a outorga de uso da água.

Na Figura 15 estão representadas as vazões mínimas ($Q_{7,10}$ e $Q_{95\%}$) das estações consideradas no rio São Francisco, nos períodos de 1962 a 1976 e de 1979 a 2000, bem como as equações ajustadas das referidas vazões.

Verificou-se, em ambos os períodos estudados, que as equações ajustadas tipo polinomial quadrática (período de 1962 a 1976) e potencial (1979 a 2000) apresentaram altos coeficientes de determinação, tanto pela análise da $Q_{7,10}$ quanto da $Q_{95\%}$, com índices de desempenho dos modelos classificados como ótimos, segundo o critério de CAMARGO e SENTELHA (1997).

As maiores variações evidenciadas no primeiro período, ocorridas no comportamento da $Q_{7,10}$, estimada pela equação de regressão em relação à calculada a partir da série histórica, foram identificadas nas estações Bom Jesus da Lapa e São Francisco, com variações de 20,0 e 5,8%, respectivamente, sendo a primeira relacionada ao aumento da vazão mínima calculada a partir da série histórica e a segunda, à sua redução. Na $Q_{95\%}$, as variações evidenciadas foram maiores que as constatadas por ocasião da análise com a $Q_{7,10}$, chegando a atingir valores da ordem de 22,9%, na estação Bom Jesus da Lapa. No período de 1979 a 2000, as variações tenderam a ser menores que as do primeiro período, tanto na análise com a $Q_{7,10}$ quanto na com a $Q_{95\%}$, sendo as máximas variações da ordem de 13,7 e 13,8%, respectivamente, ocorridas na estação Manga.



▲ Q_{7,10} (1962-1976) ■ Q_{7,10} (1979-2000) ◆ Q_{95%} (1962-1976) ● Q_{95%} (1979-2000)

*Identificador/Estação: 1/Pirapora-Barreiro, 2/São Romão, 3/São Francisco, 4/Manga, 5/Carinhanha, 6/Bom Jesus da Lapa, 7/Ibotirama, 8/Morpará, 9/Juazeiro e 10/Traipu

Figura 15 – Variação da vazão mínima de sete dias de duração e período de retorno de 10 anos ($Q_{7,10}$) e vazão mínima associada à permanência de 95% ($Q_{95\%}$) no rio São Francisco, em função da área de drenagem, considerando-se os períodos de 1962 a 1976 e de 1979 a 2000.

As reduções evidenciadas nas vazões mínimas (Q_7 , $Q_{7,10}$, $Q_{95\%}$) com o aumento da área de drenagem e o fato de serem essas vazões utilizadas em estudos de outorga indicam a potencialidade do uso das equações propostas, uma vez que estaria evitando que as vazões máximas de serem outorgadas em posições mais a jusante fossem menores que nas seções a montante.

No período de 1979 a 2000, evidenciou-se aumento nas vazões mínimas em todas as estações consideradas no trabalho, sendo nas duas últimas estações (Juazeiro e Traipu) o aumento mais expressivo, ou seja, superior a $400 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ em relação à estação Morpará. O expressivo crescimento das vazões mínimas nessas estações está associado ao efeito de regularização proporcionado pela construção dos reservatórios de acumulação.

Com base no estudo realizado por GARRIDO (2003), que mencionou que a vazão total comprometida pelas outorgas emitidas na bacia do São Francisco correspondia, até o ano de 2002, a uma vazão da ordem de $541,4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, pode-se observar que esse valor corresponde a 38,4% da $Q_{7,10}$ e a 35,2% da $Q_{95\%}$ (representado pela estação Traipu). Considerando o critério citado por GARRIDO (2003) como o adotado em rios de domínio da união (correspondente a 70% da $Q_{5\%}$), observou-se que a vazão outorgada atualmente corresponde a 50,3% daquela potencialmente outorgável. Verificou-se, entretanto, que, caso fossem utilizados os dados correspondentes ao período anterior ao do reservatório de Sobradinho, quando as precipitações médias foram menores e não havia o efeito de regularização do reservatório, a vazão outorgada corresponderia a 51,6% da $Q_{5\%}$, o que equivaleria a um montante de 73,7% da vazão máxima outorgável.

4.3. Estimativa da evaporação líquida no lago de Sobradinho com o uso do método do tanque Classe A e dos modelos Linacre, Kohler et al. e CRLE

4.3.1. Evaporação no lago de Sobradinho

Na Figura 16 estão apresentadas as evaporações médias mensais estimadas pelo método do tanque Classe A (com coeficiente de tanque 0,6) e pelos modelos Linacre, Kohler et al. e CRLE. As evaporações totais anuais estimadas por esses modelos foram: 2.149 mm pelo modelo Linacre, 2.026 mm pelo tanque Classe A, 1.904 mm pelo modelo Kohler et al. e 1.796 mm pelo modelo CRLE. A evaporação total anual estimada pelo tanque Classe A foi, aproximadamente, a média dos valores calculados pelos modelos Linacre e Kohler et al. No Apêndice D, encontram-se os dados relativos a essa análise.

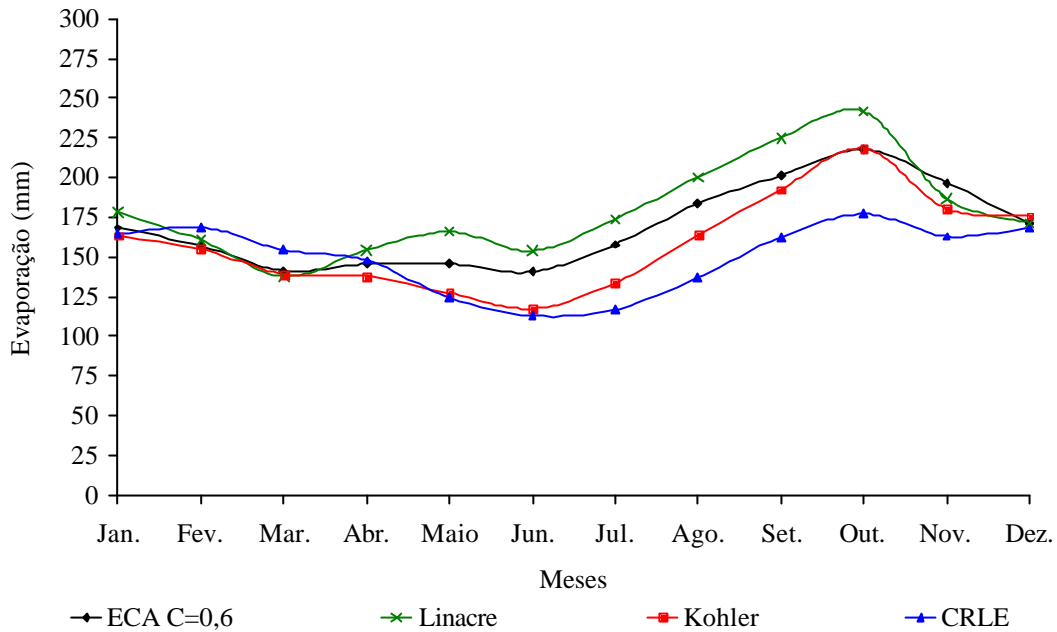


Figura 16 – Evaporação (mm) no lago de Sobradinho estimada pelo método do tanque Classe A e pelos modelos Linacre, Kohler et al. e CRLE, considerando-se o período de 1980 a 1999.

Tendo em vista que o método do tanque Classe A apresentou um valor médio entre os modelos Linacre e Kohler et al. e respondeu diretamente às condições climáticas da região, ele foi adotado como modelo-padrão na comparação dos comportamentos evidenciados pelos demais modelos.

Na Figura 16 evidenciam-se dois efeitos distintos no comportamento da evaporação no reservatório de Sobradinho, os quais compreendem, de modo geral, expressivo aumento da evaporação a partir de junho (em outubro, todos os modelos atingem o valor máximo) e redução a partir de outubro, prolongada até junho. Neste mês, os valores foram mínimos em todos os modelos, à exceção de Linacre, que apresentou a menor estimativa da evaporação em março.

A estimativa da evaporação obtida pelos modelos estudados pode ser mais bem entendida pela análise de sensibilidade à variação da temperatura, velocidade do vento, precipitação e insolação, como mostrado na Figura 17.

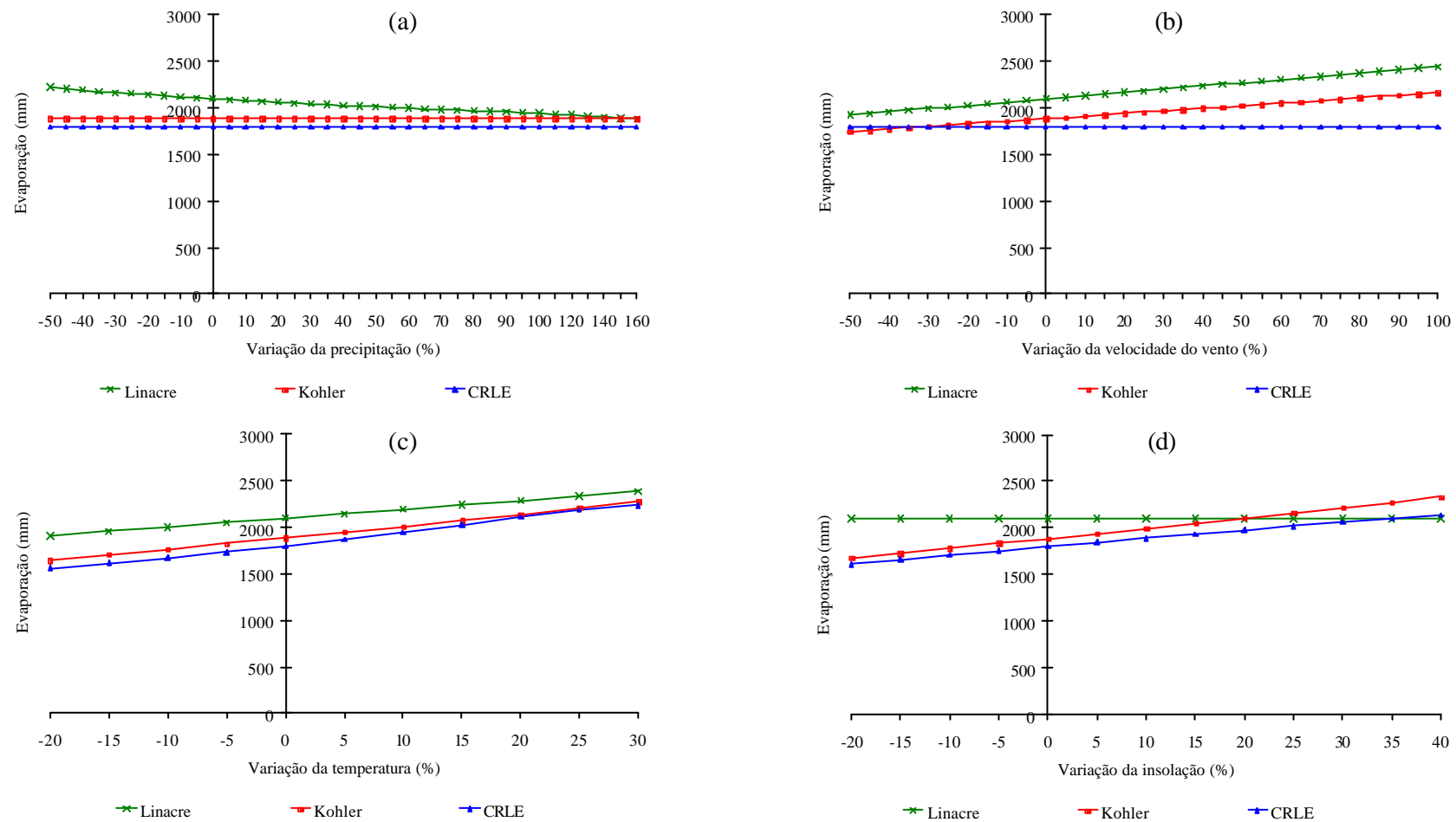


Figura 17 – Sensibilidade dos modelos Linacre, Kohler et al. e CRLE aos parâmetros climáticos relativos à precipitação (a), velocidade do vento (b), temperatura (c) e insolação (d).

Considerando o mês de maior evaporação no reservatório de Sobradinho (outubro), que se caracteriza pela baixa precipitação e umidade relativa, pela máxima insolação e por valores mais elevados de temperatura e velocidade de vento (Figura 18), observa-se que o modelo Linacre é o que apresenta a maior estimativa da evaporação no reservatório. Pela análise de sensibilidade apresentada na Figura 17, o modelo Linacre é o único sensível à variação da precipitação, conforme pode ser evidenciado pela declividade da linha que representa esse parâmetro (Figura 17a). Sendo baixa a precipitação em outubro, o modelo Linacre tende a uma maior estimativa da evaporação em relação aos modelos Kohler et al. e CRLE.

Outro fator que contribui para a maior estimativa da evaporação pelo uso do modelo Linacre é a sensibilidade que este apresenta à variação da velocidade do vento, principalmente quando comparado com o modelo CRLE, que não apresenta sensibilidade a essa variável climática. A alta velocidade de vento em outubro (Figura 18b) ocasionou maior aumento na estimativa de evaporação pelo modelo Linacre. Entretanto, com relação ao modelo Kohler et al., notou-se que as declividades das linhas representadas pelas variações desse parâmetro (Figura 17b) são praticamente iguais, não sendo, portanto, o fator que conduziu a diferença na estimativa da evaporação nesse mês.

Em relação à análise de sensibilidade à temperatura (Figura 17c), o modelo Linacre é menos sensível em comparação com os modelos Kohler et al. e CRLE, fazendo com que o aumento da temperatura em outubro (Figura 18c) ocasionasse maior aproximação entre eles, bem como a falta de sensibilidade à insolação pelo modelo Linacre e as altas sensibilidades dos modelos Kohler et al. e CRLE (Figura 18d).

Constatou-se, também, que o modelo Kohler et al. apresentou um valor de evaporação muito acima do estimado por CRLE, fato que pode ser explicado pela análise da velocidade do vento e pela temperatura, as quais o modelo Kohler et al. apresentou maior e menor sensibilidade, respectivamente.

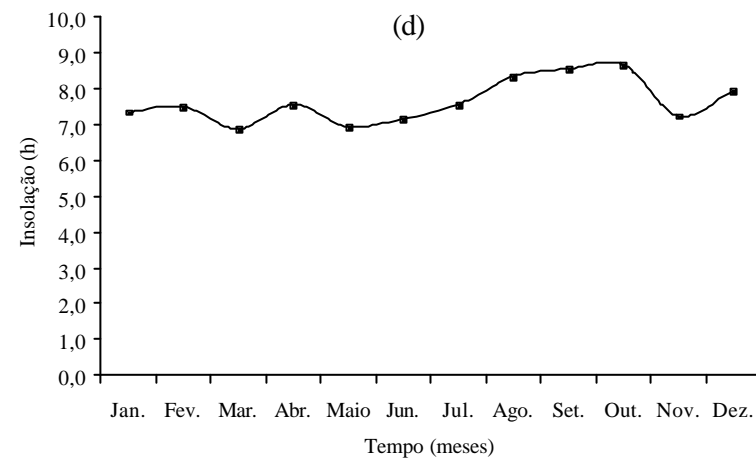
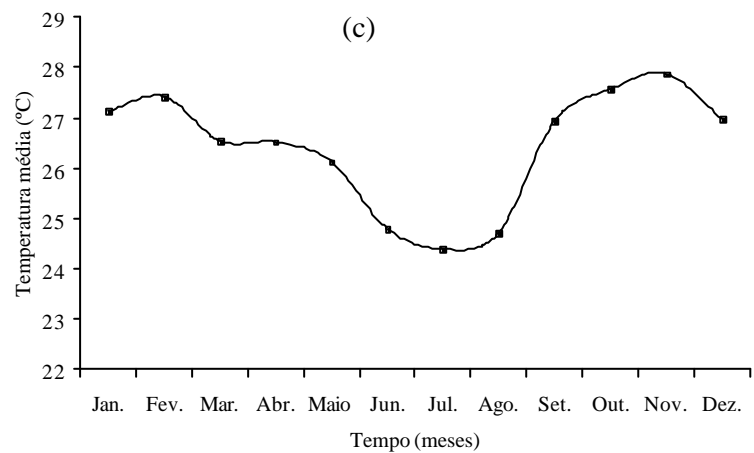
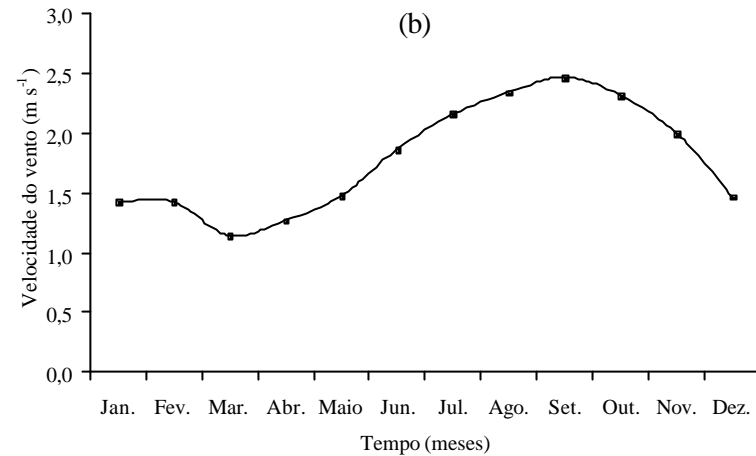
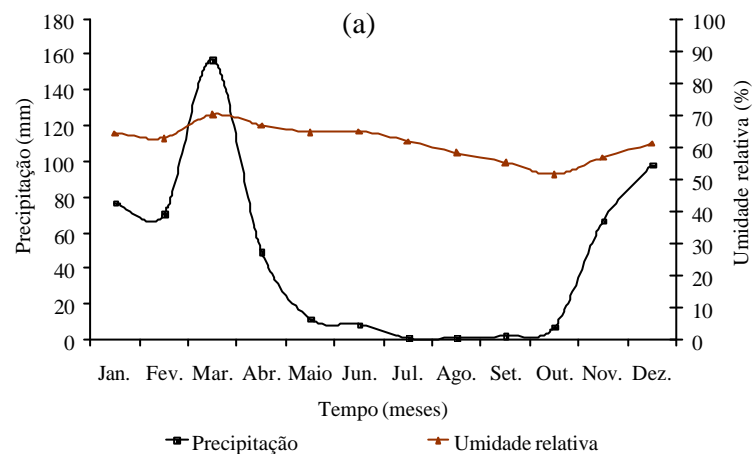


Figura 18 – Variação da precipitação e umidade relativa (a), velocidade do vento (b), temperatura (c) e insolação (d) na estação Sobradinho (BA), considerando-se o período de 1980 a 1999.

O mês de menor evaporação no reservatório de Sobradinho (junho) correspondeu ao final do período chuvoso, com exceção do modelo Linacre. Esse mês caracterizava-se por baixas precipitação, temperatura e insolação e alta umidade relativa, bem como velocidade de vento correspondente à média anual (Figura 18). A maior proximidade na estimativa da evaporação entre os modelos Kohler et al. e CRLE pode ser explicada por: a) maior sensibilidade dos modelos Kohler et al. e CRLE à temperatura, tendo sido identificado nesse mês baixa temperatura; e b) ocorrência de velocidade de vento ainda não expressiva na região. O aumento das diferenças entre os modelos Kohler et al. e CRLE em relação ao Linacre (Figura 16) ocorreu, principalmente, devido às baixas precipitação e insolação.

A alta precipitação evidenciada em março (157 mm), correspondendo a cerca de 30% do total anual precipitado, e a baixa velocidade do vento ($1,1 \text{ m s}^{-1}$) fizeram com que o modelo Linacre apresentasse a menor estimativa da evaporação nesse mês. Outro fato a ser considerado em março foi a maior estimativa da evaporação obtida pelo modelo CRLE, que estava relacionada com a maior sensibilidade do modelo à temperatura e com a falta de sensibilidade à velocidade do vento.

De modo geral, observou-se que o modelo Linacre tendeu a uma maior estimativa da evaporação em toda a faixa de variação contemplada na análise de sensibilidade. Entretanto, quando a precipitação, a temperatura e a insolação aumentavam e a velocidade do vento diminuía, os modelos estudados tendiam a convergir para uma mesma estimativa da evaporação, fato evidenciado, principalmente, nos meses de janeiro e dezembro.

4.3.2. Evaporação líquida no lago de Sobradinho

Sabendo que a evaporação líquida de um reservatório é obtida pela diferença entre a evaporação do lago e a evapotranspiração real antes da formação desse lago, apresenta-se no Quadro 6 a estimativa da evapotranspiração real obtida pelo balanço hídrico climático, segundo o método proposto por

THORNTHWAITE e MATHER (1955), bem como a evapotranspiração potencial e a precipitação na região estudada antes da implantação do reservatório de Sobradinho.

Quadro 6 – Evapotranspiração real (E_{TR} , mm), evapotranspiração potencial (E_{TP} , mm) e precipitação (Ppt, mm) na região do reservatório de Sobradinho antes da sua formação, segundo o método do balanço hídrico de THORNTHWAITE e MATHER (1955)

Mês	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Total
E_{TR}	75,9	88,7	130,2	96,9	26,2	13,4	13,6	2,9	6,0	17,4	38,3	64,7	574,2
E_{TP}	171,2	151,3	144,2	132,9	130,9	118,3	126,9	156,8	173,8	193,6	183,3	177,0	1860,2
Ppt	75,9	88,7	130,2	96,9	26,2	13,4	13,6	2,9	6,0	17,4	38,3	64,7	574,2

Pela análise do Quadro 6, verifica-se uma evapotranspiração potencial superior à precipitação total anual, fazendo com que ocorra um déficit hídrico muito acentuado na localidade do reservatório de Sobradinho e que a evapotranspiração real fique limitada ao total precipitado, uma vez que a evapotranspiração real não poderia superar a precipitação evidenciada na região.

Na Figura 19, apresenta-se a evaporação líquida no lago de Sobradinho estimada pelos modelos do tanque Classe A, Linacre, Kohler et al. e CRLE, a qual foi calculada subtraindo-se as evaporações do lago estimadas pelos modelos da evapotranspiração real. Os comportamentos foram semelhantes aos da evaporação do lago, entretanto com queda nos valores calculados, sendo esta mais acentuada em março, em decorrência da alta evapotranspiração real ocasionada pela elevação da elevada precipitação média mensal.

As evaporações líquidas totais anuais estimadas pelos modelos tanque Classe A (com coeficiente de tanque de 0,6), Linacre, Kohler et al. e CRLE foram de 1.452, 1.575, 1.330 e 1.222 mm, respectivamente. No Apêndice E, encontram-se os dados relativos a essa análise.

Com os valores das estimativas das evaporações líquidas e conhecidas as áreas de acumulação do lago de Sobradinho (Apêndice F), calcularam-se as vazões decorrentes dessas evaporações, apresentadas no Quadro 7.

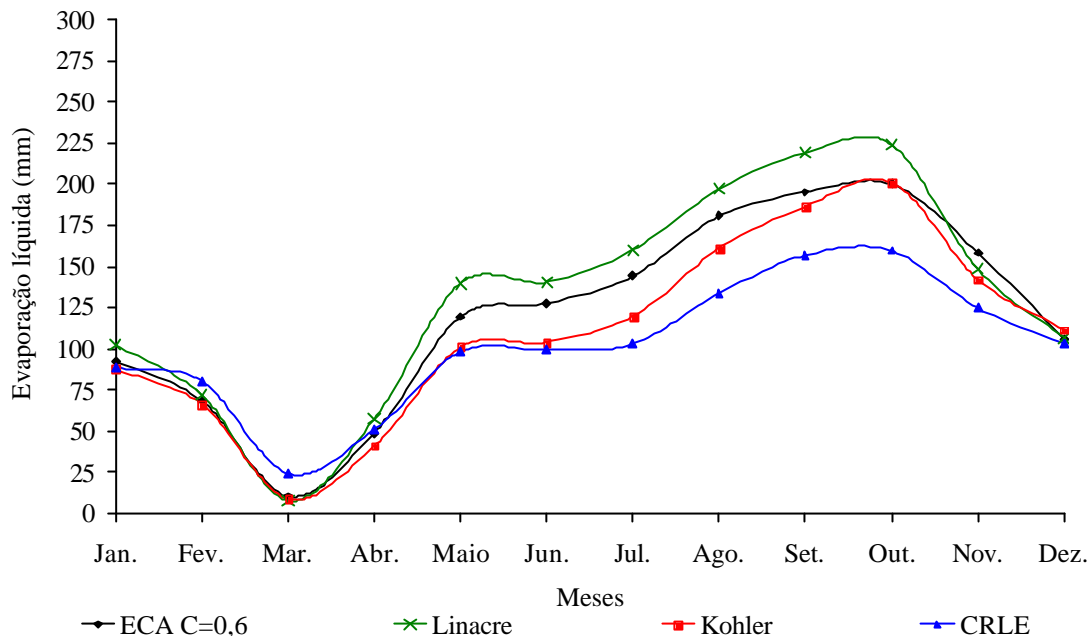


Figura 19 – Evaporação líquida (mm) no lago de Sobradinho estimada pelos modelos do tanque Classe A, Linacre, Kohler et al. e CRLE, considerando-se o período de 1980 a 1999.

Quadro 7 – Vazão líquida evaporada no reservatório de Sobradinho, estimada com o uso dos modelos do tanque Classe A (ECA C=0,6), Linacre, Kohler et al. e CRLE

Modelos	Vazão Líquida Evaporada ($m^3 s^{-1}$)
CRLE	120
ECA C=0,6	140
Kohler et al.	130
Linacre	155

A comparação entre os quatros modelos utilizados permitiu evidenciar que o modelo CRLE, embora seja o de maior complexidade de utilização, foi o que apresentou o comportamento com maior discrepância em relação aos demais, subestimando, inclusive, a evaporação no reservatório, fato que ocorreu, basicamente, devido à falta de sensibilidade do modelo à velocidade do vento.

Comparando os modelos Kohler et al. e Linacre, evidenciou-se que o modelo Kohler et al. apresentou valores um pouco inferiores aos encontrados pelo Linacre, decorrente do fato de este ser mais sensível à variação da temperatura.

Tendo em vista que o modelo Kohler et al. apresenta uma base conceitual mais fundamentada na equação original de Penman e levando em conta os termos aerodinâmicos e o saldo de radiação, considera-se que os valores estimados pelo modelo Kohler et al. podem ser utilizados como uma boa alternativa na determinação da evaporação média anual no lago de Sobradinho. O modelo Linacre, apesar de estar baseado na equação original de Penman, considera na estimativa do saldo de radiação os dados de chuva, diferentemente do modelo Kohler et al., que se baseia na insolação.

Considerando que o modelo do tanque Classe A representa bem a variação sazonal da evaporação e que o principal problema desse método está na determinação do coeficiente do tanque, sugere-se, como procedimento alternativo para representação da evaporação do reservatório de Sobradinho, a correção dos valores obtidos pelo método do tanque Classe A a partir do uso de um coeficiente de tanque que represente a relação entre o valor de evaporação obtido pelo modelo de Kohler et al. e as evaporações medidas no tanque Classe A. Essa correção conduz a um valor de 0,57 em vez de 0,6, inicialmente utilizado como coeficiente de tanque. Portanto, considerando os valores obtidos por esse procedimento, a vazão média anual correspondente à evaporação líquida no lago de Sobradinho era de $132 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, sendo, na análise mensal, a vazão líquida evaporada de maior magnitude de $211 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, ocorrida em setembro.

Quadro 8 – Evaporações média mensal e líquida (mm) no reservatório de Sobradinho, estimadas com o uso do método do tanque Classe A com coeficiente de 0,57

	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Total
Evaporação	160	149	133	138	138	134	150	174	191	207	187	162	1.924
Evaporação líquida	84	61	3	42	112	121	136	171	185	189	149	98	1.350

5. CONCLUSÕES

Os resultados permitiram as seguintes conclusões:

- As variáveis hidrológicas estudadas (precipitação, vazão média, vazão mínima e coeficiente de deságüe) apresentaram valores médios no período de 1979 a 2000 superiores aos de 1950 a 1976.

- As precipitações e as vazões específicas médias anuais de longa duração diminuíram da nascente para a foz do São Francisco.

- As áreas de drenagem dos afluentes Pará, Paraopeba, Abaeté, Velhas, Paracatu, Urucuaia, Pandeiros, Verde Grande, Carinhanha, Corrente e Grande, representando 46,3% da área da bacia do São Francisco, contribuíram com 81% da sua vazão no período de 1950 a 1976.

- A sub-bacia do rio Verde Grande, dentre as estudadas, foi a única com precipitação inferior à média do São Francisco e também a única com vazão específica inferior à desse rio.

- As sub-bacias com as maiores contribuições para a formação da vazão do São Francisco são as dos rios Paracatu, Grande e Velhas.

- O procedimento desenvolvido para a compensação de comportamentos atípicos ao longo do rio São Francisco apresentou bom potencial de utilização não só pelo ótimo ajuste obtido pelas equações propostas, refletindo o

comportamento médio da bacia, mas também pelo fato de constituir uma boa alternativa em estudos relativos à concessão de outorga para uso da água.

- Os valores obtidos pelo modelo de Kohler et al. podem ser utilizados como base de referência para a estimativa da evaporação média anual do lago de Sobradinho.

- O coeficiente de tanque Classe A que melhor representou a variação sazonal de evaporação no lago de Sobradinho foi 0,57.

- O modelo CRLE foi o de maior discrepância em relação aos demais.

- A vazão média anual correspondente à evaporação líquida do reservatório de Sobradinho era de $132 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R.G. **Ref-Et**. Reference evapotranspiration calculator. Idaho: University of Idaho Research and Extension Center Kimberly, 2000.

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Grop evapotranspiration**: guidelines for computing crop water requirements. FAO irrigation and drainage. Roma: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1998. 328 p. (Paper, 56).

ALMANAQUE Vale do São Francisco 2001. Brasília, DF: CODEVASF, 2001. 411 p.

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **A evolução da gestão dos recursos hídricos no Brasil**. Brasília, DF, 2002. 64 p. (Edição comemorativa do dia mundial da água).

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. **Bacias hidrográficas**. Bacia do Rio São Francisco. Apresenta a caracterização, disponibilidade hídrica e plano de recursos hídricos. Disponível em: <<http://www.ana.gov.br>>. Acesso em: 12 abr. 2004.

ANA; GEF; PNUMA; OEA. **Diagnóstico analítico da bacia do rio São Francisco e da sua zona costeira**. Brasília, DF: ANA, 2003.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Atlas hidrológico brasileiro** – Versão 1.0. Brasília: ANEEL, 1998. CD-ROM.

ANJOS, E.F.S. **Os comitês de bacia hidrográfica**: lições da experiência de Minas Gerais. Brasília, DF: UnB, 2003. 139 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Sustentável) – Centro de Desenvolvimento Sustentável, Universidade de Brasília, Brasília.

BRASIL, Plano Nacional de Recursos Hídricos. **Documento base de referência**. Brasília, DF: MMA/SRH/ANA, 2003. 373 p.

BRASIL. **Política nacional de recursos hídricos**: Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Brasília, DF: MMA/SRH, 1997.

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

CBH-SF – Comitê da bacia do rio São Francisco. **Bacias do Rio São Francisco**. Disponível em: <<http://www.cbhsaofrancisco.org.br>>. Acesso em: 12 abr. 2004.

CBHSF – Comitê da bacia hidrográfica do rio São Francisco. **Plano de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio São Francisco**. Módulo 1, Resumo executivo. Proposta para apreciação do plenário do CBHSF, 2004. 329 p.

CHAVES, H.M.L.; ROSA, J.W.C.; VADAS, R.G.; OLIVEIRA, R.V.T. Regionalização de vazões mínimas em bacias através de interpolação em sistemas de informações geográficas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 7, n. 3, p. 43-51, 2002.

CODEVASF – Companhia de Desenvolvimento do Vale do São Francisco e do Parnaíba. **Potenciais energéticos**. Disponível em: <<http://www.codevasf.gov.br>>. Acesso em: 12 abr. 2004.

CODEVASF – Mapa de áreas irrigadas – **Bacia do rio São Francisco**, 1999. 1 mapa. Escala: 1:2.000.000.

CORREIA, M.F.; DIAS, M.A.F.S. Variação do nível do reservatório de Sobradinho e seu impacto sobre o clima da região. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n. 1, p. 157-168, 2003.

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. v. 2, p. 162-169.

EUCLYDES, H.P. et al. **RH 3.0** - Regionalização hidrológica; manual do programa. Viçosa, MG: UFV/DEA; Brasília, DF: MMA; Belo Horizonte, MG: RURALMINAS, 1999. 149 p.

FREITAS, A.J. Gestão de recursos hídricos. In: SILVA, D.D.; PRUSKI, F.F. **Gestão de recursos hídricos: aspectos legais, econômicos, administrativos e sociais**. Brasília, DF: Secretaria de Recursos Hídricos; Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa; Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2000. 659 p.

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).

GARRIDO, R.J.S. Subprojeto 4.2B – avaliação dos mecanismos financeiros para o gerenciamento sustentável da bacia do Rio São Francisco. In: **Projeto de gerenciamento integrado das atividades desenvolvidas em terra na bacia do São Francisco**. Brasília, DF: ANA/GEF/PNUMA/OEA, 2003. 335 p. (Relatório Final).

GOMES, H.P. Análise do desempenho hidro-agrícola do perímetro de irrigação Nilo Coelho. Associação Brasileira de Recursos Hídricos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos – RBRH**, Porto Alegre, v. 6, n. 2, p. 119-127, 2001.

HOUNAM, C.E. **Comparison between pan and laki evaporation**. World meteorological organization. Geneva – Switzerland: WMO, 1973. n. 354.

IORIS, A.A.R. Water resource development in São Francisco river basin (Brazil): conflicts and management perspectives. **International Water Resources Association**, v. 26, n. 1, p. 24-39, 2001.

KAN, A.; DIAS, N.L. Evaporação, evapotranspiração e evaporação líquida no reservatório de Foz do Areia. Associação Brasileira de Recursos Hídricos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos – RBRH**, 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**, 1955. 21 p. (Paper 38).

LANNA, A.E.L. **Gerenciamento da bacia hidrográfica: aspectos conceituais e metodológicos**. Brasília, DF: IBAMA, 1995.

LIMA, J.F.W.; FERREIRA, R.S.A.; CRUZ, H.P. Metodologia de estimativa da redução da capacidade de geração de energia devido ao uso da água para irrigação: o caso da bacia do Rio São Francisco. In: **SIMPÓSIO INTERAMERICANO DE GESTÃO DAS ÁGUAS**, 2001, Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu, PR: SRH/MMA, 2001. (CD-Rom).

LIMA, J.P.R.; MIRANDA, E.A. Fruticultura irrigada no vale do São Francisco: incorporação tecnológica, competitiva e sustentabilidade. **Revista Econômica do Nordeste**, Fortaleza, v. 32, p. 611-632, 2001. Número especial.

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**, Amsterdam, v. 64, p. 237-256, 1993.

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.

ONS, Operadora Nacional do Sistema Elétrico. **Vetores de evaporação líquida para o subsistema nordeste**. [S.l.: s.n.], 2003. 44 p.

ONS; FAHMA; DREER. Estimativa das vazões para atividade de uso consuntivo da água nas principais bacias do sistema interligado nacional. In: BRAGA, R.S.; GOMES, M.P. (Coord.). **Metodologia e resultados consolidados**. [S.l.: s.n.], 2004. 209 p. (Relatório Final).

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

PEREIRA, S.B.; PRUSKI, F.F.; NOVAES, L.F.; SILVA, D.D.; RAMOS, M.M. Distribuição espacial das variáveis hidrológicas na bacia do rio São Francisco. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, v. 11, n. 1-4, p. 32-42, 2003.

RAMOS, M.M.; PRUSKI, F.F. Subprojeto 4.3 – Quantificação e análise da eficiência do uso da água pelo setor agrícola na Bacia do São Francisco. In: ANA; GEF; PNUMA; OEA. **Projeto gerenciamento integrado das atividades desenvolvidas em terra na bacia do São Francisco**. Viçosa, MG, 2003. 190 p. (Relatório final).

RAMOS, M.M.; SILVA, D.D. **Geografia das águas**. Associação Brasileira de Educação Agrícola Superior. Brasília, DF: ABEAS; Viçosa: UFV/DEA, 2001. 83 p. (Curso Uso Racional dos Recursos Naturais e seus Reflexos no Meio Ambiente, Módulo 4).

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

ROBINSON, J.M.; HUBBARD, K.G. Soil water assessment model for several crops in high plains. **Agronomy Journal**, v. 82, p. 1141-1148, 1990.

RODRIGUEZ, F.A.; HOLTZ, G.P. Subprojeto 4.5.A – Diagnóstico analítico da bacia e sua zona costeira. In: ANA; GEF; PNUMA; OEA. **Projeto gerenciamento integrado das atividades desenvolvidas em terra na bacia do São Francisco**. Viçosa, MG, 2003. 190 p. (Relatório Final).

RODRIGUEZ, R.D.G. **Metodologia para estimativa da demanda e disponibilidades hídricas**: estudo de caso para a bacia do Paracatu. Viçosa, MG: UFV, 2004. 90 f. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Ambiental) – Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

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

SETTI, A.A.; LIMA, J.E.F.W.; CHAVES, A.G.M.; PEREIRA, I.C. **Introdução ao gerenciamento de recursos hídricos**. 2. ed. Brasília, DF: ANEEL/ANA, 2001. 328 p.

SILVA, D.D.; RAMOS, M.M. **Planejamento e gestão integrados de recursos hídricos**. Associação Brasileira de Educação Agrícola Superior. Brasília, DF: ABEAS; Viçosa: UFV/DEA, 2001. 89 p. (Curso de especialização por tutoria à distância: Uso Racional dos Recursos Naturais e seus Reflexos no Meio Ambiente, Módulo 10).

SRH/MMA, Plano Nacional de Recursos Hídricos. **Diagnóstico das regiões hidrográficas** – Versão 2, bacia do São Francisco, Brasília, DF, 2002.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. **The water balance**. Publications in Climatology. New Jersey: Drexel Institute of Technology, 1955. 104 p.

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

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. v. 2, p. 193-202.

TUCCI, C.E.M. (Org.). **Hidrologia**: ciência e aplicação. 3. ed. Porto Alegre: UFRGS; ABRH, 2002. 943 p.

TUCCI, C.E.M.; HESPANHOL, I.; CORDEIRO NETTO, O.M. **Gestão da Água no Brasil**. Brasília, DF: UNESCO, 2001. 153 p.

VILLA NOVA, N.A. **Evapotranspiração e evaporação**. Piracicaba, SP: Departamento de Física e Meteorologia da ESALQ/USP, 1980.

WILLMOTT, C.J. On the validation on models. **Physical Geography**, v. 2, n. 2, p. 184-194, 1981.

APÊNDICES

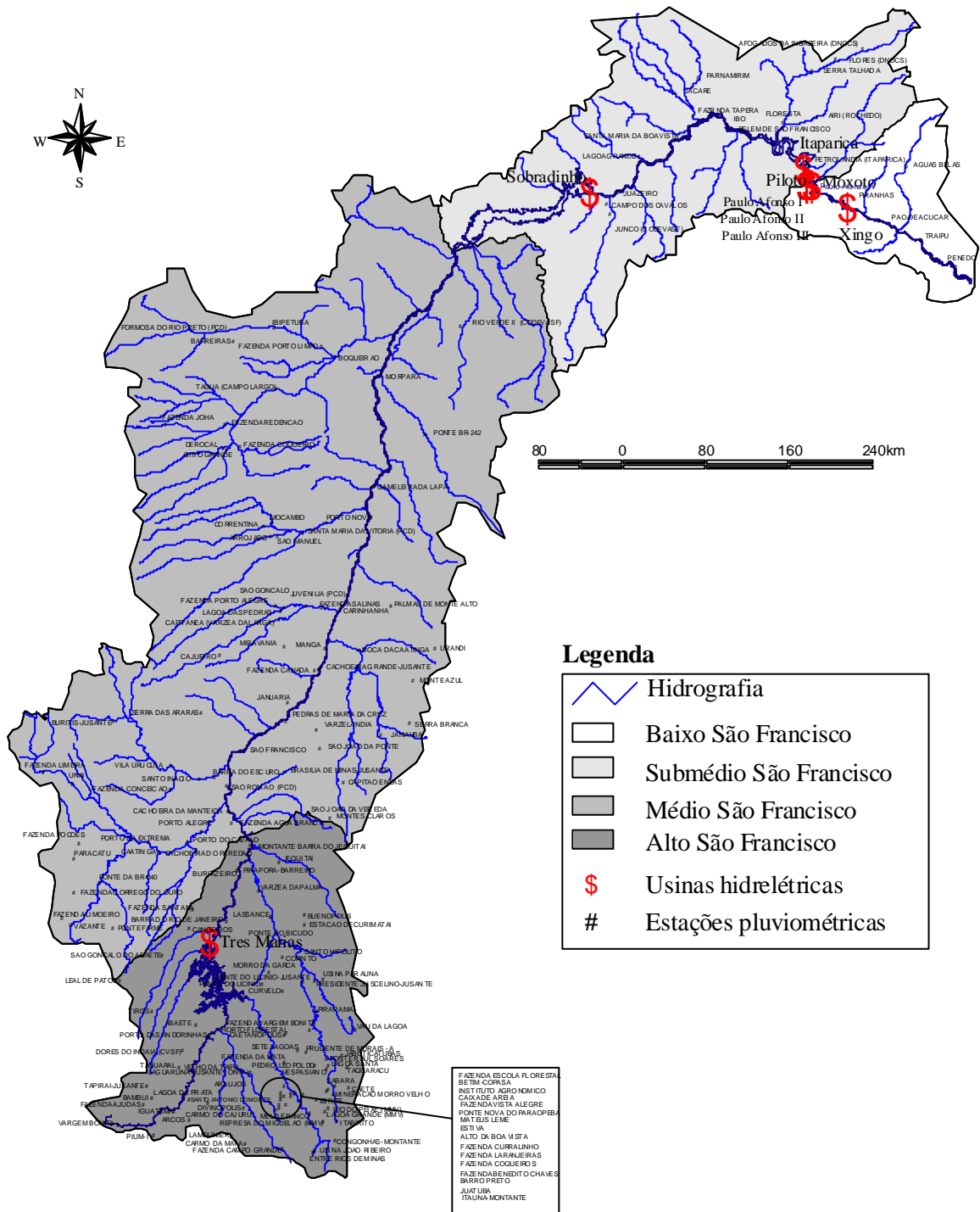


Figura 1A – Mapa com a localização das estações pluviométricas estudadas.

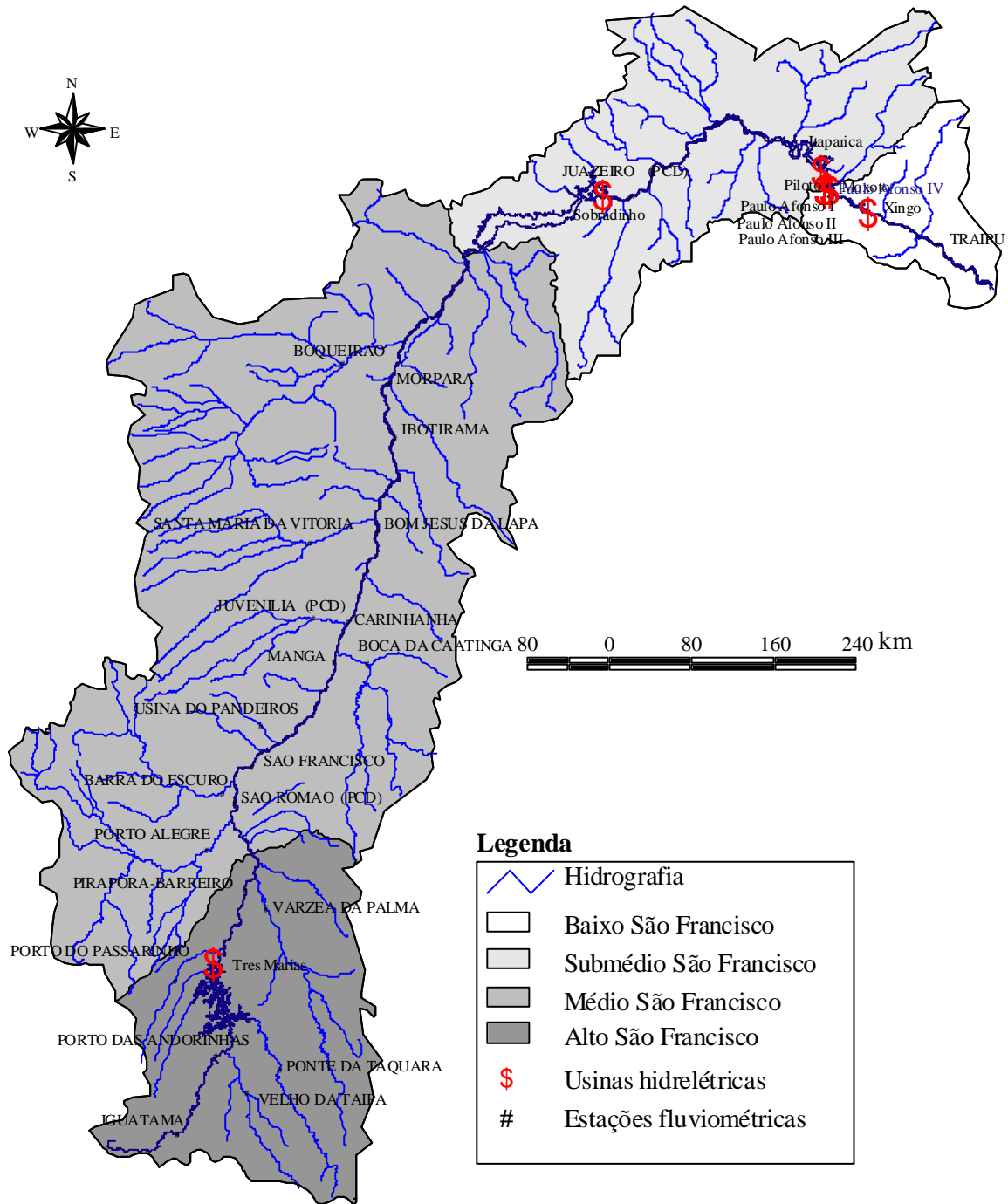


Figura 2A – Mapa com a localização das estações fluviométricas estudadas.

APÊNDICE B

Quadro 1B – Elementos climáticos da estação Sobradinho relativo ao período posterior à construção do reservatório de Sobradinho

Mês/Elemento	Ano	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Total	Média	
Temperatura (°C)	1980	26,4	25,2	25,8	26,9	26,7	25,6	26,4	23,2	30,7	31,3	31,8	26,98		27,2	
Precipitação (mm/mês)		107,8	214,6	8,9	15,5	0	0	0	0,9	0	0	0	0	26	373,7	
Insolação (horas/dia)		7,3	5,6	9,0	9,5	9,3	8,9	9,6	9,2	8,5	8,5	7,9	7,1			8,4
Evaporação (mm/mês)		231,3	153,1	225,4	294,0	313,1	297,3	309,1	382,9	374,1	303,7	336,0	355,9	3.575,7		
Velocidade do vento (m/s)		1,3	0,8	1,0	1,6	1,9	2,0	2,1	2,9	2,4	3,2	1,9	1,6			1,9
Umidade relativa do ar (%)		80,0	89,0	76,0	70,0	69,0	70,0	71,0	65,0	65,0	54,0	59,0	61,0			69,1
Temperatura (°C)	1984	28,7	29,7	28,0	26,5	26,0	24,8	24,7	25,8	26,4	27,8	28,2	29,3		27,2	
Precipitação (mm/mês)		11,4	3,2	157,8	84,6	5,0	1,5	0,0	3,0	3,2	6,2	64,0	13,0	352,9		
Insolação (horas/dia)		7,9	5,1	4,9	5,4	4,2	3,1	3,8	5,0	6,1	8,3	9,5	10,3			6,1
Evaporação (mm/mês)		364,3	384,8	309,4	228,3	247,4	252,0	324,0	363,3	360,3	433,4	415,8	412,0	4.094,9		
Velocidade do vento (m/s)		2,0	2,2	1,7	1,5	1,5	2,0	2,6	1,7	2,9	3,0	2,7	2,1			2,2
Umidade relativa do ar (%)		61,0	60,0	72,0	74,0	68,0	73,0	66,0	66,0	67,0	52,0	49,0	49,0			63,1
Temperatura (°C)	1985	25,8	26,1	26,5	25,3	24,7	23,4	23,1	24,4	26,9	27,6	27,2	24,9		25,5	
Precipitação (mm/mês)		188,1	120,7	212,2	117,8	78,2	31,2	4,2	0,0	0,0	1,4	72,0	124,6	950,4		
Insolação (horas/dia)		4,6	8,3	7,4	6,0	7,4	7,4	8,2	8,5	9,7	7,7	7,7	5,2			7,3
Evaporação (mm/mês)		213,3	238,6	246,1	174,3	200,0	196,8	257,0	293,0	345,0	357,7	373,2	212,7	3.107,6		
Velocidade do vento (m/s)		1,4	1,3	1,2	1,0	1,3	1,7	2,6	2,8	3,0	2,3	2,7	1,5			1,9
Umidade relativa do ar (%)		76,0	71,0	72,0	78,0	77,0	74,0	66,0	61,0	64,0	55,0	58,0	72,0			68,7
Temperatura (°C)	1986	26,7	26,3	25,5	26,6	26,2	24,5	24,3	25,6	26,4	28,4	27,7	28,3		26,4	
Precipitação (mm/mês)		3,0	135,6	162,8	31,9	7,8	0,0	0,0	0,0	0,0	13,1	18,6	44,3	417,1		
Insolação (horas/dia)		8,1	7,6	6,7	8,0	8,4	8,4	7,3	9,0	9,1	9,6	8,8	7,9			8,2
Evaporação (mm/mês)		325,5	263,2	223,2	261,0	285,2	294,0	293,3	326,1	372,6	342,2	335,4	277,5	3.599,2		
Velocidade do vento (m/s)		1,8	1,5	1,3	1,6	2,0	2,8	2,5	2,6	3,4	2,7	3,0	2,2			2,3
Umidade relativa do ar (%)		61,0	65,0	72,0	63,0	58,0	58,0	56,0	52,0	48,0	51,0	51,0	53,0			57,3

Continua...

Quadro 1B – Cont.

Temperatura (°C)		28,0	28,9	26,3	26,2	25,5	25,1	25,1	25,7	28,9	28,6	28,8	28,4		27,1
Precipitação (mm/mês)		21,0	20,1	315,4	21,3	12,0	0,5	0,0	0,5	0,5	1,8	27,9	39,5	460,5	
Insolação (horas/dia)	1987	9,1	9,2	5,4	8,0	6,3	7,8	9,1	9,2	9,2	9,5	8,6	8,1		8,3
Evaporação (mm/mês)		328,0	338,8	186,6	235,2	222,6	236,4	283,3	295,4	333,3	367,0	358,2	322,4	3.507,3	
Velocidade do vento (m/s)		2,1	2,6	1,4	1,4	1,7	2,4	2,5	2,6	2,7	2,4	2,3	2,0		2,2
Umidade relativa do ar (%)		54,0	51,0	72,0	64,0	64,0	61,0	55,0	51,0	46,0	47,0	52,0	54,0		55,9
Temperatura (°C)		27,5	28,9	26,0	25,4	24,4	23,9	23,4	24,0	25,6	27,0	27,7	25,5		25,8
Precipitação (mm/mês)		109,4	40,5	112,2	142,3	0,0	28,4	5,3	0,6	0,0	22,1	80,2	151,5	692,5	
Insolação (horas/dia)	1988	7,5	8,8	6,9	7,8	8,3	6,7	7,3	9,4	8,8	7,9	7,8	6,1		7,8
Evaporação (mm/mês)		285,5	328,9	219,8	248,4	213,0	197,1	233,1	310,6	336,6	325,8	349,5	248,3	3.296,6	
Velocidade do vento (m/s)		1,9	2,0	1,2	1,4	1,3	1,9	2,8	3,2	3,3	2,8	2,6	1,6		2,2
Umidade relativa do ar (%)		62,0	51,0	73,0	70,0	64,0	68,0	63,0	54,0	50,0	54,0	53,0	72,0		61,2
Temperatura (°C)		26,9	27,9	26,7	27,2	25,8	25,4	23,9	25,0	26,8	28,0	27,5	24,4		26,3
Precipitação (mm/mês)		37,3	12,6	123,6	0,0	14,7	41,4	0,0	4,1	0,0	0,0	73,8	473,9	781,4	
Insolação (horas/dia)	1989	7,3	5,2	7,3	7,6	5,7	7,5	6,7	8,6	9,0	9,2	7,1	9,2		7,5
Evaporação (mm/mês)		283,3	294,0	270,6	264,6	224,1	222,3	231,6	282,4	318,9	369,2	281,7	176,4	3.219,2	
Velocidade do vento (m/s)		1,8	1,6	1,5	1,8	1,9	2,7	2,3	2,8	2,5	2,8	2,0	1,1		2,1
Umidade relativa do ar (%)		60,0	56,0	66,0	63,0	66,0	64,0	64,0	57,0	54,0	50,0	60,0	83,0		61,9
Temperatura (°C)		26,9	27,0	27,1	26,7	25,8	24,1	23,4	23,8	25,7	27,0	27,0	27,1		26,0
Precipitação (mm/mês)		46,7	103,9	194,4	34,7	25,5	0,4	0,5	0,6	0,0	0,0	75,0	17,9	499,6	
Insolação (horas/dia)	1991	6,5	9,2	7,4	8,7	7,0	7,2	7,7	7,0	5,7	8,5	6,5	8,1		7,4
Evaporação (mm/mês)		226,9	234,6	259,5	250,5	239,3	211,5	261,3	282,1	377,7	471,5	294,9	285,5	3.395,4	
Velocidade do vento (m/s)		1,4	1,3	1,2	1,3	1,8	1,9	2,3	2,8	2,4	2,5	1,5	1,4		1,8
Umidade relativa do ar (%)		65,0	61,0	65,0	63,0	62,0	65,0	58,0	62,0	56,0	45,0	59,0	48,0		59,1

Continua...

Quadro 1B – Cont.

Temperatura (°C)	26,4	25,3	26,8	27,0	25,2	25,4	24,3	24,9	26,2	27,9	28,5	26,3		26,2
Precipitação (mm/mês)	187,5	18,1	3,1	21,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	71,9	82,5	384,2	
Insolação (horas/dia)	1992	4,6	5,6	7,4	7,5	9,2	8,2	7,2	8,3	10,2	9,4	8,3	6,2	7,7
Evaporação (mm/mês)	249,6	190,0	290,2	276,3	280,9	237,9	252,0	284,6	297,9	349,4	335,4	282,4	3.326,4	
Velocidade do vento (m/s)	1,0	1,2	1,7	1,3	1,5	2,0	2,2	2,2	2,3	2,0	1,7	1,4		1,7
Umidade relativa do ar (%)	64,0	75,0	62,0	62,0	55,0	59,0	61,0	56,0	52,0	53,0	62,0	68,0		60,8
Temperatura (°C)	27,8	27,5	26,2	26,9	26,4	25,4	24,6	25,1	26,1	27,9	27,2	28,5		26,6
Precipitação (mm/mês)	135,3	64,2	219,4	3,8	1,8	0,4	0,0	0,0	0,0	2,0	8,4	68,7	504,0	
Insolação (horas/dia)	1994	9,4	6,7	6,6	6,6	7,5	5,8	7,3	9,1	7,8	8,2	8,6	8,3	7,7
Evaporação (mm/mês)	310,0	210,0	176,7	234,0	262,6	210,0	217,0	279,6	299,4	309,4	329,1	309,1	3.146,8	
Velocidade do vento (m/s)	0,9	0,9	0,6	1,1	1,3	1,5	1,8	1,8	2,6	1,8	1,4	1,5		1,4
Umidade relativa do ar (%)	68,0	62,0	75,0	64,0	59,0	60,0	63,0	54,0	54,0	52,0	55,5	60,5		60,6
Temperatura (°C)	28,1	28,6	27,6	26,8	26,3	24,3	24,3	25,1	26,7	22,0	26,3	25,8		26,0
Precipitação (mm/mês)	1,0	32,8	121,8	38,9	2,5	2,5	0,0	0,0	0,0	0,0	186,2	35,2	420,9	
Insolação (horas/dia)	1996	8,5	8,8	7,1	6,9	7,5	7,9	8,3	8,9	9,2	9,5	6,8	9,0	8,2
Evaporação (mm/mês)	263,2	280,7	198,7	231,9	248,0	241,2	243,7	272,8	327,0	341,0	255,9	269,4	3.173,5	
Velocidade do vento (m/s)	1,2	1,0	0,6	0,9	1,0	1,3	1,4	1,6	1,8	1,7	1,6	1,1		1,3
Umidade relativa do ar (%)	58,0	57,0	67,0	69,0	62,7	67,0	59,5	59,0	54,7	48,0	63,0	59,0		60,3
Temperatura (°C)	26,1	26,6	25,7	25,6	23,8	24,9	23,8	24,2	27,1	27,8	27,2	28,2		25,9
Precipitação (mm/mês)	85,2	62,3	203,2	131,9	3,3	1,0	0,0	0,0	0,0	45,6	16,5	20,5	569,5	
Insolação (horas/dia)	1997	6,3	8,7	5,0	7,6	5,4	7,9	7,5	8,8	9,5	9,0	0,9	9,5	7,2
Evaporação (mm/mês)	220,4	221,6	172,1	177,6	165,2	201,6	242,4	274,4	303,0	290,2	298,2	319,3	2.886,0	
Velocidade do vento (m/s)	0,8	1,1	0,8	0,6	0,9	0,7	1,4	1,4	1,0	1,1	0,9	1,0		1,0
Umidade relativa do ar (%)	67,0	62,0	74,5	70,7	74,2	65,0	62,5	55,2	48,5	50,2	53,2	51,5		61,2
Temperatura (°C)	27,5	28,5	26,8	27,7	32,9	25,6	25,8	24,6	26,6	27,2	27,2	27,0		27,3
Precipitação (mm/mês)	62,4	85,6	204,6	0,0	1,1	3,8	0,0	2,4	26,4	0,0	169,6	176,4	732,3	
Insolação (horas/dia)	1999	8,4	8,6	8,0	8,7	4,0	6,2	8,1	7,4	8,2	7,2	5,5	7,9	7,4
Evaporação (mm/mês)	340,7	265,2	265,1	282,0	257,0	256,6	270,9	330,7	309,4	451,0	300,5	233,1	3.562,2	
Velocidade do vento (m/s)	0,9	1,0	0,6	0,9	1,1	1,4	1,7	2,0	2,0	1,7	1,5	0,7		1,3
Umidade relativa do ar (%)	58,0	57,0	65,0	56,0	61,0	60,0	59,0	64,0	57,0	58,0	63,0	64,0		60,2

Quadro 2B – Elementos climáticos da estação Cabrobó relativos ao período anterior à construção do reservatório de Sobradinho

Mês/Elemento	Ano	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Maió	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Total	Média
Temperatura (°C)		27,8	26,0	26,4	26,3	24,6	23,9	24,0	24,2	24,7	26,3	25,9	25,6		27,8
Precipitação (mm/mês)		73,3	71,2	39,4	30,7	34,6	8,3	2,3	0,0	0,0	14,0	0,0	237,8	511,6	
Insolação (horas/dia)	1963	9,5	8,4	6,7	5,8	6,7	3,6	7,2	8,8	7,2	8,2	8,4	6,6		7,2
Evaporação (mm/mês)															
Velocidade do vento (m/s)		2,0	1,8	2,0	1,9	2,5	2,3	1,6	2,0	2,0	1,9	2,0	1,8		2,0
Umidade relativa do ar (%)		78,5	63,4	60,7	58,4	60,1	62,4	61,3	55,3	49,6	47,9	49,8	56,0		58,6
Temperatura (°C)		25,2	25,3	26,1	25,1	24,0	23,7	23,8	24,4	25,5	27,6	27,9	28,2		25,6
Precipitação (mm/mês)		35,9	108,4	33,7	151,6	167,7	37,5	28,7	11,2	1,8	30,2	18,8	10,7	636,2	
Insolação (horas/dia)	1964	7,5	7,8	5,5	4,9	6,2	5,4	5,7	7,2	8,5	8,0	8,4	7,6		6,9
Evaporação (mm/mês)															
Velocidade do vento (m/s)		1,7	1,6	2,2	1,6	2,0	1,9	1,7	2,8	1,8	1,4	1,5	1,9		1,8
Umidade relativa do ar (%)		57,6	61,7	58,3	59,3	69,5	69,8	65,8	61,6	54,1	49,5	53,8	45,1		58,8
Temperatura (°C)		27,5	27,9	27,9	25,4	25,1	23,9	23,8	24,2	25,6	27,5	28,4	28,0		26,3
Precipitação (mm/mês)		34,5	17,9	182,1	183,3	4,0	9,0	7,4	0,0	9,0	6,7	31,9	28,7	514,5	
Insolação (horas/dia)	1965	7,2	8,1	5,9	6,8	6,8	1,6	4,4	8,4	9,2	8,9	9,8	8,6		7,1
Evaporação (mm/mês)															
Velocidade do vento (m/s)		2,4	2,5	1,9	1,9	1,8	2,1	2,4	2,3	3,1	2,2	2,8	2,2		2,3
Umidade relativa do ar (%)		49,7	50,6	59,2	67,6	62,2	64,8	61,1	57,2	53,9	55,0	54,8	55,3		57,6
Temperatura (°C)		28,2	25,5	26,8	25,2	24,6	23,3	23,4	24,3	26,0	28,1	28,0	27,2		25,9
Precipitação (mm/mês)		35,2	117,6	105,7	200,9	5,2	27,9	3,7	5,2	4,8	0,0	81,8	131,1	719,1	
Insolação (horas/dia)	1966	8,9	5,2	7,8	5,0	5,6	2,9	4,3	8,3	7,8	10,1	7,7	8,8		6,9
Evaporação (mm/mês)															
Velocidade do vento (m/s)		2,1	1,6	2,4	1,6	1,9	2,4	2,8	3,1	2,7	2,3	2,0	1,6		2,2
Umidade relativa do ar (%)		58,5	74,7	64,5	75,9	71,7	73,3	70,9	61,1	59,4	47,7	52,9	61,8		64,4

Continua...

Quadro 2B – Cont.

		27,2	27,1	25,6	26,0	25,0	23,5	23,1	24,0	25,7	27,3	28,0	27,7	25,8
		0,2	112,1	210,2	52,0	22,1	5,4	10,5	0,7	5,3	18,2	52,0	81,0	569,7
	1968	10,2	7,0	6,0	7,6	5,2	5,6	6,0	6,2	9,0	9,8	7,0	8,0	7,3
		1,5	1,4	1,3	1,7	1,5	1,6	1,9	2,0	4,0	1,6	1,8	2,0	1,8
		56,0	64,0	73,7	64,1	69,4	70,0	70,0	61,8	78,1	48,0	51,3	78,0	65,4
		27,3	27,6	26,6	26,7	25,9	25,3	24,0	25,0	26,3	28,3	28,0	27,7	26,6
		28,8	83,2	161,9	29,5	9,8	47,1	31,7	1,8	0,0	0,0	51,0	46,2	491,0
	1969	4,1	8,0	6,4	6,9	6,5	6,9	4,5	7,4	9,6	10,4	8,8	8,0	7,3
		2,1	1,9	1,5	1,7	1,7	1,6	2,0	2,4	3,4	2,5	2,0	1,7	2,0
		60,3	61,9	67,1	64,9	64,7	65,8	71,1	60,8	52,9	50,5	78,5	57,2	63,0
		26,9	27,0	26,6	27,7	26,6	25,9	24,6	25,2	27,1	28,5	27,3	28,8	26,8
		199,8	22,6	59,0	0,1	0,0	2,9	4,5	2,3	0,4	21,3	82,7	81,0	476,6
	1970	7,1	9,1	7,5	8,6	8,5	7,6	7,1	8,7	9,7	8,8	7,5	8,7	8,2
		1,7	1,9	2,4	2,1	2,5	2,2	2,5	2,4	2,3	1,8	1,8	2,0	2,1
		63,6	60,7	62,9	54,4	55,2	57,6	59,0	57,1	51,3	49,2	52,8	76,3	58,3
		28,6	29,4	28,2	27,3	26,8	26,4	25,7	26,4	27,1	27,9	29,8	29,2	27,7
		50,3	28,4	190,9	51,4	4,1	24,3	8,9	0,0	2,7	47,3	1,9	36,0	446,2
	1973	9,0	8,0	7,3	7,5	7,2	7,0	7,6	8,6	7,8	9,1	9,4	9,4	8,1
		2,0	1,7	1,3	2,0	3,9	4,3	4,9	5,6	5,4	4,2	4,2	3,4	3,6
		58,0	51,0	71,6	70,6	67,6	64,4	61,6	54,3	54,2	52,1	42,5	49,4	58,1

Continua...

Quadro 2B – Cont.

Temperatura (°C)		27,4	26,0	25,6	25,4	24,7	24,0	23,2	24,8	26,2	28,4	27,6	28,4		26,0
Precipitação (mm/mês)		124,0	268,8	235,3	192,7	31,3	10,6	9,8	3,7	1,3	20,7	29,8	48,8	976,8	
Insolação (horas/dia)	1974	7,7	7,1	6,7	6,3	6,5	6,0	6,0	8,8	8,5	9,9	8,3	9,5		7,6
Evaporação (mm/mês)		267,4	138,0	100,7	86,3	118,5	196,1	247,9	358,4	389,7	425,9	324,0	337,6	2.990,5	
Velocidade do vento (m/s)		3,1	2,6	2,6	2,2	2,9	4,0	5,2	5,5	3,9	4,1	4,1	3,4		3,6
Umidade relativa do ar (%)		60,1	73,0	78,2	80,0	77,1	68,5	68,0	56,0	52,5	44,4	53,5	51,6		63,6
Temperatura (°C)		28,2	26,6	26,9	26,4	24,4	23,7	22,8	24,2	25,7	28,5	28,7	28,1		26,2
Precipitação (mm/mês)		65,5	118,5	150,0	122,6	31,8	52,6	54,7	6,1	0,1	0,0	13,8	16,4	632,1	
Insolação (horas/dia)	1975	8,7	7,7	7,0	6,8	4,8	4,9	4,7	7,8	8,0	9,5	10,4	8,8		7,4
Evaporação (mm/mês)		320,3	140,3	157,7	135,1	143,2	153,8	172,4	309,4	362,8	432,3	484,3	423,4	3.235,0	
Velocidade do vento (m/s)		3,5	2,4	2,4	2,7	3,5	3,8	4,2	5,4	6,0	4,0	4,1	4,0		3,8
Umidade relativa do ar (%)		55,2	67,9	68,4	71,1	74,0	74,1	73,0	60,0	56,0	42,7	38,2	46,9		60,6
Temperatura (°C)		28,3	26,0	27,0	25,5	26,4	25,0	24,4	25,2	27,2	27,2	27,7	28,5		26,5
Precipitação (mm/mês)		19,9	133,2	124,1	138,6	0,9	0,0	1,6	0,0	9,8	3,3	189,0	1,2	621,6	
Insolação (horas/dia)	1976	9,6	7,6	8,7	8,3	8,7	8,3	8,6	9,8	8,9	7,5	8,7	10,4		8,8
Evaporação (mm/mês)		491,7	187,2	241,1	184,1	313,6	340,5	387,6	430,1	432,3	367,8	311,1	431,1	4.118,2	
Velocidade do vento (m/s)		4,8	2,6	3,2	3,3	3,7	4,8	5,4	5,0	4,3	4,4	3,6	4,0		4,1
Umidade relativa do ar (%)		44,1	65,3	62,3	66,9	54,7	55,7	52,6	46,9	46,4	52,4	52,9	45,2		53,8
Temperatura (°C)		26,9	27,1	28,3	26,4	25,3	24,5	23,8	24,8	26,4	28,2	29,7	27,1		26,5
Precipitação (mm/mês)		109,6	6,3	19,1	122,0	87,8	27,2	17,4	4,4	0,8	3,7	42,6	138,7	579,6	
Insolação (horas/dia)	1977	5,2	7,8	7,5	6,0	4,8	5,9	5,1	8,5	7,5	8,9	10,1	6,1		6,9
Evaporação (mm/mês)		276,5	269,2	328,0	142,9	172,9	179,0	230,6	306,1	340,1	458,6	485,4	251,4	3.440,7	
Velocidade do vento (m/s)		3,7	4,1	3,6	2,9	3,8	4,1	4,9	5,4	5,7	5,3	3,3	2,2		4,1
Umidade relativa do ar (%)		62,5	59,2	53,8	70,0	68,4	68,4	65,7	56,4	55,5	47,0	40,5	61,7		59,1

Quadro 3B – Elementos climáticos da estação Floresta relativos ao período anterior à construção do reservatório de Sobradinho

Mês/Elemento	Ano	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Total	Média	
Temperatura (°C)	1961	28,6	28,3	27,8	26,8	26,2	24,9	24,6	24,2	25,9	27,2	28,4	28,9		26,8	
Precipitação (mm/mês)		121,6	7,4	90,2	39,0	9,0	13,1	10,2	2,4	0,0	0,6	0,0	6,4	299,9		
Insolação (horas/dia)		8,5	8,7	7,0	7,4	7,3	7,0	7,4	8,9	9,2	9,3	10,6	8,8		8,3	
Evaporação (mm/mês)																
Velocidade do vento (m/s)		2,0	1,6	1,8	1,9	2,6	4,3	3,2	3,7	3,9	4,0	3,7	1,8		2,9	
Umidade relativa do ar (%)		61,6	62,9	70,5	66,2	66,6	72,7	70,2	60,1	55,6	59,6	48,4	54,0		62,4	
Temperatura (°C)	1962	29,6	28,9	28,3	27,7	25,5	23,9	23,4	24,1	26,0	28,3	29,3	29,0		27,0	
Precipitação (mm/mês)		69,6	5,9	71,0	131,5	17,0	18,6	13,6	2,0	1,7	0,0	9,6	35,7	376,2		
Insolação (horas/dia)		9,5	9,2	7,1	7,6	7,1	5,3	6,6	8,5	8,3	10,0	8,8	8,4		8,0	
Evaporação (mm/mês)																
Velocidade do vento (m/s)		1,5	1,8	2,7	2,3	2,4	3,2	2,9	3,3	3,3	3,6	2,3	1,9		2,6	
Umidade relativa do ar (%)		51,8	52,6	59,4	63,9	79,2	71,5	68,3	58,3	50,6	46,1	55,4	58,6		59,6	
Temperatura (°C)	1963	29,0	28,3	27,7	27,3	24,9	23,6	23,0	23,9	25,9	27,8	28,7	27,4		26,5	
Precipitação (mm/mês)		47,0	87,6	26,4	41,6	5,4	4,0	2,7	4,6	1,5	28,2	43,1	161,1	453,2		
Insolação (horas/dia)		9,5	8,4	6,2	7,0	5,9	5,8	6,9	8,2	9,0	9,8	8,9	6,7		7,7	
Evaporação (mm/mês)																
Velocidade do vento (m/s)		1,7	1,8	2,1	1,8	2,9	2,8	2,9	3,3	4,0	3,2	2,3	1,5		2,5	
Umidade relativa do ar (%)		62,4	66,7	59,8	63,1	66,7	67,2	63,6	59,7	57,3	46,4	50,5	66,3		60,8	
Temperatura (°C)	1964	26,8	27,3	27,7	27,0	25,7	24,5	24,2	24,7	25,8	28,4	28,8	28,7		26,6	
Precipitação (mm/mês)		200,3	195,7	48,6	72,9	28,8	78,6	8,6	25,8	20,5	0,0	7,6	10,7	698,1		
Insolação (horas/dia)		7,6	7,9	7,3	7,0	6,2	5,4	5,7	7,8	7,7	9,3	9,1	9,3		7,5	
Evaporação (mm/mês)																
Velocidade do vento (m/s)		1,2	1,3	1,4	1,6	1,8	2,4	1,7	2,9	2,6	2,4	2,3	1,8		2,0	
Umidade relativa do ar (%)		71,4	71,7	69,4	70,0	72,1	71,9	70,6	65,7	59,8	51,6	60,1	55,7		65,8	

Continua...

Quadro 3B – Cont.

Temperatura (°C)		28,1	28,6	28,4	26,9	26,8	25,7	24,1	24,7	26,5	28,6	29,3	28,8		27,2
Precipitação (mm/mês)		83,8	68,3	118,1	186,9	3,5	5,2	5,7	4,2	0,1	7,7	32,3	19,8	535,6	
Insolação (horas/dia)	1965	7,6	8,7	7,4	7,5	7,2	5,8	7,3	8,5	9,2	8,9	9,8	8,6		8,1
Evaporação (mm/mês)															
Velocidade do vento (m/s)		1,7	1,4	1,4	1,2	1,8	2,1	2,2	2,5	3,0	2,0	2,3	1,5		1,9
Umidade relativa do ar (%)		54,4	56,0	60,4	73,9	63,6	67,8	64,5	61,1	52,6	50,2	49,7	54,2		59,0
Temperatura (°C)		29,2	26,4	27,5	26,0	25,2	23,8	23,4	24,0	26,0	28,4	28,7	28,3		26,4
Precipitação (mm/mês)		26,6	100,2	21,2	210,2	24,6	11,3	7,4	0,6	10,5	5,2	33,2	79,7	530,7	
Insolação (horas/dia)	1966	8,9	5,9	7,8	5,0	5,3	5,1	5,0	8,4	8,0	10,6	7,7	9,0		7,2
Evaporação (mm/mês)															
Velocidade do vento (m/s)		1,8	1,4	2,0	1,2	1,2	1,9	2,5	2,5	2,9	2,4	2,4	1,6		2,0
Umidade relativa do ar (%)		55,7	69,9	59,6	77,0	75,8	76,4	73,0	59,9	60,2	48,8	57,4	60,3		64,5
Temperatura (°C)		29,1	28,2	27,3	26,6	25,5	24,2	23,0	22,5	25,6	27,4	29,0	27,6		26,3
Precipitação (mm/mês)		51,4	75,3	261,9	165,4	40,8	8,6	10,7	6,9	14,4	1,2	14,0	167,0	817,6	
Insolação (horas/dia)	1967	10,9	3,6	7,5	7,3	6,2	5,2	7,0	7,2	9,2	9,5	9,9	8,0		7,6
Evaporação (mm/mês)															
Velocidade do vento (m/s)		2,0	1,3	1,4	1,2	1,4	2,4	2,3	3,2	2,6	3,2	1,9	1,7		2,0
Umidade relativa do ar (%)		52,0	62,0	67,9	74,8	74,7	68,7	67,8	63,8	52,4	51,2	45,8	58,4		61,6
Temperatura (°C)		27,1	28,0	26,2	26,6	24,9	22,8	22,4	23,7	25,1	27,4	28,5	28,1		25,9
Precipitação (mm/mês)		23,6	92,5	457,5	34,2	41,0	14,2	9,9	1,9	0,8	0,4	12,9	96,7	785,6	
Insolação (horas/dia)	1968	9,5	8,2	6,3	7,5	5,5	5,4	5,4	6,9	9,0	10,2	8,3	8,0		7,5
Evaporação (mm/mês)															
Velocidade do vento (m/s)		1,8	1,6	1,3	1,6	2,0	1,9	2,3	1,9	2,5	2,1	1,7	1,7		1,9
Umidade relativa do ar (%)		54,8	58,2	71,2	62,8	73,0	72,0	69,4	62,4	53,1	44,4	47,0	53,8		60,2

Continua...

Quadro 3B – Cont.

Temperatura (°C)		27,5	28,0	27,5	27,6	26,4	25,4	23,8	24,7	26,6	28,7	29,8	28,5	27,0
Precipitação (mm/mês)		111,2	61,7	145,5	2,6	37,0	12,1	45,8	3,5	0,0	0,7	0,0	107,8	527,9
Insolação (horas/dia)	1969	7,9	9,1	6,8	6,9	6,4	6,0	3,9	9,0	9,1	9,9	10,4	8,0	7,8
Evaporação (mm/mês)														
Velocidade do vento (m/s)		1,5	1,3	1,2	1,5	1,6	1,7	2,0	2,2	2,7	2,1	2,7	1,5	1,8
Umidade relativa do ar (%)		58,5	60,0	68,5	63,2	68,8	67,4	74,3	61,3	49,7	45,3	48,2	60,2	60,5
Temperatura (°C)		27,7	28,4	27,2	28,4	26,6	25,8	23,8	24,8	26,9	28,8	28,8	29,0	27,2
Precipitação (mm/mês)		184,9	5,9	130,3	3,2	0,0	5,7	12,5	5,3	3,5	162,1	102,2	4,6	620,2
Insolação (horas/dia)	1970	7,9	9,4	8,0	8,2	8,6	7,7	9,6	8,9	9,5	9,7	8,4	9,2	8,7
Evaporação (mm/mês)														
Velocidade do vento (m/s)		1,6	1,8	1,5	2,1	1,7	2,0	2,4	2,4	3,0	1,9	1,6	1,4	1,9
Umidade relativa do ar (%)		63,6	59,2	65,4	53,7	53,8	60,6	67,2	65,0	62,2	48,5	49,9	46,6	58,0
Temperatura (°C)		27,9	28,8	28,1	26,9	26,3	25,5	24,8	25,2	26,2	27,5	29,3	29,1	27,1
Precipitação (mm/mês)		80,2	11,3	203,9	29,8	21,8	15,5	17,0	5,1	9,6	49,1	23,5	16,2	483,0
Insolação (horas/dia)	1973	9,3	8,1	7,6	7,5	8,1	6,8	7,5	8,5	8,7	8,8	9,7	9,9	8,4
Evaporação (mm/mês)														
Velocidade do vento (m/s)		2,0	2,3	1,4	1,6	2,2	2,2	2,0	3,2	3,9	3,2	2,7	2,5	2,4
Umidade relativa do ar (%)		59,8	53,1	65,2	64,0	63,4	67,1	63,5	58,6	57,1	49,9	41,3	46,8	57,5
Temperatura (°C)		27,7	26,6	25,9	25,6	24,8	23,9	22,0	23,8	25,5	28,3	27,3	28,3	25,8
Precipitação (mm/mês)		221,7	310,7	222,9	110,6	46,1	4,6	24,3	6,2	0,0	20,5	43,2	23,0	1.033,8
Insolação (horas/dia)	1974	8,3	8,0	7,2	7,0	7,2	6,2	5,2	8,6	8,2	10,1	8,2	9,6	7,8
Evaporação (mm/mês)														
Velocidade do vento (m/s)		2,0	1,2	1,2	1,1	1,4	2,0	2,5	2,7	4,4	2,8	2,2	3,0	2,2
Umidade relativa do ar (%)		55,6	68,6	77,0	78,0	75,0	69,0	76,3	58,8	53,3	42,7	55,0	51,3	63,4

Continua...

Quadro 3B – Cont.

Temperatura (°C)		27,8	27,2	26,9	26,4	24,2	23,6	22,5	23,3	25,0	28,2	28,6	28,0		26,0
Precipitação (mm/mês)		100,0	46,4	286,9	79,3	25,3	30,2	73,1	1,4	1,6	1,6	7,5	4,2	657,5	
Insolação (horas/dia)	1975	7,9	8,8	7,8	7,9	4,6	5,1	4,7	7,8	8,2	9,8	10,2	8,5		7,6
Evaporação (mm/mês)															
Velocidade do vento (m/s)		2,7	1,4	1,7	1,4	1,8	2,3	2,1	3,6	4,2	2,7	2,9	3,1		2,5
Umidade relativa do ar (%)		55,5	61,3	67,1	70,8	75,7	76,1	81,8	68,8	57,9	45,0	43,9	53,2		63,1
Temperatura (°C)		27,9	26,9	27,3	25,8	26,1	24,4	23,7	24,8	27,0	26,9	28,4	28,4		26,5
Precipitação (mm/mês)		28,1	103,6	34,6	110,4	0,9	0,8	2,9	0,0	38,1	1,9	37,3	27,4	386,0	
Insolação (horas/dia)	1976	9,8	7,9	8,3	8,5	8,7	8,5	8,2	10,2	9,6	7,4	9,3	10,1		8,9
Evaporação (mm/mês)															
Velocidade do vento (m/s)		2,7	1,6	2,2	1,9	2,4	3,4	3,5	3,8	2,7	2,8	1,9	3,1		2,7
Umidade relativa do ar (%)		54,5	60,7	57,2	64,5	57,5	58,6	55,8	50,6	49,3	57,2	50,3	51,2		55,6
Temperatura (°C)		26,9	27,1	28,1	27,1	25,3	24,2	23,0	24,3	25,8	28,0	29,3	27,6		26,4
Precipitação (mm/mês)		105,8	5,4	32,3	174,9	75,5	45,6	20,7	6,5	3,0	0,8	33,4	115,2	619,1	
Insolação (horas/dia)	1977	5,5	8,5	8,2	6,8	4,8	5,3	4,6	8,8	7,5	9,4	9,9	6,9		7,2
Evaporação (mm/mês)															
Velocidade do vento (m/s)		2,0	2,5	2,1	1,4	1,6	1,9	2,4	2,9	2,6	2,6	2,0	1,6		2,1
Umidade relativa do ar (%)		63,5	56,3	54,7	65,7	71,6	72,4	72,3	59,9	55,4	48,9	44,4	59,6		60,4

Quadro 4B – Elementos climáticos da estação Petrolina relativos ao período anterior à construção do reservatório de Sobradinho

Mês/Elemento	Ano	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Maió	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Total	Média
Temperatura (°C)		30,8	30,8	31,8	31,5	28,3	27,1	26,3	26,9	28,5	29,8	30,9	29,2		29,3
Precipitação (mm/mês)		82,0	61,0	6,5	51,3	0,0	0,0	1,8	0,0	0,0	4,4	39,3	76,6	322,9	
Insolação (horas/dia)	1963	9,5	8,3	6,7	5,8	6,7	3,6	7,3	8,8	7,2	8,2	8,3	6,6		7,2
Evaporação (mm/mês)															
Velocidade do vento (m/s)		2,0	1,4	2,0	3,0	8,8	7,4	7,5	8,3	7,7	6,9	5,6	3,8		5,4
Umidade relativa do ar (%)		56,7	65,2	55,5	59,7	54,8	51,6	49,0	42,9	40,0	37,4	46,4	60,8		51,7

Continua...

Quadro 4B – Cont.

Temperatura (°C)		29,1	28,7	28,2	28,3	28,6	27,3	26,5	26,7	27,8	29,7	29,3	31,0		28,4
Precipitação (mm/mês)		243,7	307,9	64,6	104,9	6,5	3,4	1,0	4,7	3,4	9,6	119,7	75,0	944,4	
Insolação (horas/dia)	1964	7,5	7,8	5,6	5,0	6,2	5,4	5,7	7,2	8,5	8,0	8,4	7,6		6,9
Evaporação (mm/mês)															
Velocidade do vento (m/s)		3,6	3,7	5,1	6,1	6,7	7,7	8,0	8,6	8,5	6,5	5,2	3,8		6,1
Umidade relativa do ar (%)		71,5	74,6	73,4	71,2	66,2	60,8	57,6	54,2	47,7	44,4	54,1	56,8		61,0
Temperatura (°C)		28,0	29,1	27,2	26,2	26,1	26,2	25,3	26,1	26,7	26,8	28,9	28,8		27,1
Precipitação (mm/mês)		10,3	15,0	258,6	102,8	40,3	7,7	21,3	2,7	18,2	121,9	13,4	43,3	655,5	
Insolação (horas/dia)	1973	8,8	8,0	6,4	7,7	7,4	7,5	7,8	9,6	7,6	8,3	8,7	9,5		8,1
Evaporação (mm/mês)															
Velocidade do vento (m/s)		3,3	3,4	2,1	2,8	3,9	4,7	4,7	5,1	4,9	3,5	3,2	3,2		3,7
Umidade relativa do ar (%)		60,2	52,9	70,9	71,3	65,7	60,9	58,4	51,4	53,2	57,2	47,4	50,7		58,4
Temperatura (°C)		27,6	26,5	25,9	25,7	24,7	23,8	22,8	24,5	26,0	28,2	27,1	27,7		25,9
Precipitação (mm/mês)		59,1	123,7	166,3	296,5	43,4	3,8	5,7	0,7	1,3	45,6	17,8	70,8	834,7	
Insolação (horas/dia)	1974	6,9	7,1	6,5	6,8	7,0	6,8	6,9	8,4	8,5	9,3	7,4	9,2		7,6
Evaporação (mm/mês)		236,2	152,0	124,0	112,0	125,7	158,8	230,7	293,7	347,8	343,8	271,5	276,1	2.672,3	
Velocidade do vento (m/s)		3,0	2,7	2,6	2,7	3,4	4,1	5,2	4,5	4,9	3,7	3,6	3,2		3,6
Umidade relativa do ar (%)		59,9	66,5	73,7	75,5	73,4	67,8	63,6	54,4	48,3	47,3	56,3	56,4		61,9
Temperatura (°C)		27,7	26,9	26,8	26,3	24,9	24,7	23,8	24,2	25,7	28,3	29,0	27,8		26,3
Precipitação (mm/mês)		85,2	46,4	241,8	41,5	4,0	6,9	29,8	1,2	1,9	45,6	14,7	22,5	541,5	
Insolação (horas/dia)	1975	8,0	8,5	7,6	7,3	5,9	6,0	6,1	8,5	8,3	9,4	9,8	8,7		7,8
Evaporação (mm/mês)		301,4	179,4	185,8	135,0	196,2	214,5	223,3	298,4	326,4	375,4	374,8	345,1	3.155,7	
Velocidade do vento (m/s)		3,6	2,5	2,9	3,2	4,4	4,5	4,8	5,4	5,2	3,5	3,5	3,8		3,9
Umidade relativa do ar (%)		56,9	61,7	64,9	70,7	66,4	63,1	64,4	58,5	54,4	46,8	44,4	53,0		58,8

Continua...

Quadro 4B – Cont.

Temperatura (°C)		28,4	26,2	27,7	27,5	27,0	25,3	24,5	25,2	27,2	26,8	27,2	28,4		26,8
Precipitação (mm/mês)		1,2	241,2	5,7	1,2	0,0	1,6	3,0	0,0	17,8	6,7	188,5	6,2	473,1	
Insolação (horas/dia)	1976	10,3	7,4	8,6	8,5	9,0	9,4	9,6	10,1	8,7	7,8	7,7	10,2		8,9
Evaporação (mm/mês)		417,7	178,2	275,5	283,3	306,2	300,3	325,9	361,9	334,7	324,0	284,7	304,5	3.696,9	
Velocidade do vento (m/s)		3,8	2,5	3,4	3,7	3,8	4,4	4,6	4,6	3,7	4,5	3,3	3,4		3,8
Umidade relativa do ar (%)		45,1	67,2	55,2	53,6	50,9	52,8	52,3	47,9	50,1	57,4	59,2	51,2		53,6
Temperatura (°C)		26,8	27,3	28,3	27,0	26,3	24,8	24,7	25,3	26,5	27,4	29,2	27,0		26,7
Precipitação (mm/mês)		79,3	13,4	136,2	121,1	45,6	15,8	11,6	1,9	17,4	0,3	35,2	182,6	660,4	
Insolação (horas/dia)	1977	5,8	8,5	9,1	7,6	7,3	7,0	7,1	8,7	8,0	8,1	9,7	6,9		7,8
Evaporação (mm/mês)		222,8	223,4	272,5	170,4	224,4	232,8	274,7	308,1	318,2	346,8	391,7	204,0	3.189,8	
Velocidade do vento (m/s)		3,4	4,2	3,5	3,0	4,2	4,4	5,1	4,4	4,6	4,5	3,6	2,9		4,0
Umidade relativa do ar (%)		65,5	61,6	57,0	71,3	65,6	61,5	56,8	51,1	49,1	49,7	43,6	63,5		58,0

Quadro 5B – Elementos climáticos da estação Petrolândia relativos ao período anterior à construção do reservatório de Sobradinho

Mês/Elemento	Ano	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Maió	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Total	Média
Temperatura (°C)		29,6	29,9	29,6	29,3	28,0	26,1	24,9	26,2	27,9	28,9	29,9	30,6		28,4
Precipitação (mm/mês)		113,0	0,0	104,0	7,0	0,0	22,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	6,2	252,2	
Insolação (horas/dia)	1961	8,3	9,1	7,6	7,5	8,3	7,6	8,0	8,9	8,9	8,5	9,2	8,3		8,4
Evaporação (mm/mês)															
Velocidade do vento (m/s)		0,1	0,4	0,3	0,6	0,8	1,4	1,7	1,3	0,4	0,7	1,0	0,2		0,7
Umidade relativa do ar (%)		64,5	66,6	70,1	69,1	73,1	77,7	77,2	72,7	66,1	62,0	55,5	63,3		68,2
Temperatura (°C)		31,4	30,7	30,4	29,3	26,9	25,3	25,1	26,1	27,5	29,3	30,8	30,4		28,6
Precipitação (mm/mês)		63,2	30,7	48,4	126,8	57,3	25,4	11,0	0,0	0,0	0,0	23,0	7,0	392,8	
Insolação (horas/dia)	1962	9,3	9,0	7,4	8,3	7,5	6,5	7,2	8,9	8,4	9,7	8,4	8,5		8,3
Evaporação (mm/mês)															
Velocidade do vento (m/s)		0,0	0,1	0,8	0,9	1,1	1,0	1,2	1,3	1,6	1,5	0,8	1,2		1,0
Umidade relativa do ar (%)		65,7	72,2	70,7	71,5	75,9	77,4	73,9	68,8	63,4	61,1	59,0	60,5		68,3

Continua...

Quadro 5B – Cont.

Temperatura (°C)	30,8	29,7	29,6	28,8	26,4	25,8	25,1	26,1	28,1	30,3	30,7	28,9		28,3
Precipitação (mm/mês)	9,5	99,1	31,0	50,0	49,0	0,0	1,2	0,0	0,0	0,0	3,6	164,0	407,4	
Insolação (horas/dia)	1963	9,1	8,5	8,0	7,4	6,7	7,3	7,6	8,2	8,4	8,3	8,5	5,9	7,8
Evaporação (mm/mês)														
Velocidade do vento (m/s)		0,7	0,9	0,9	0,8	1,2	0,7	0,7	0,7	1,0	1,1	0,9	0,7	0,9
Umidade relativa do ar (%)		60,2	64,4	65,0	67,2	73,6	74,0	72,3	70,0	65,4	61,1	61,8	74,7	67,5
Temperatura (°C)		28,6	28,6	28,8	28,5	26,5	25,1	24,5	25,6	26,5	29,7	30,3	30,2	27,7
Precipitação (mm/mês)		126,6	86,1	46,9	58,4	60,9	31,0	7,2	4,5	12,2	12,0	8,2	29,6	483,6
Insolação (horas/dia)	1964	7,7	8,1	7,6	7,4	6,7	6,7	6,1	7,9	7,5	9,0	8,3	8,5	7,6
Evaporação (mm/mês)														
Velocidade do vento (m/s)		0,4	0,6	0,9	0,9	0,6	0,9	1,9	1,1	0,9	0,8	0,8	0,9	0,9
Umidade relativa do ar (%)		81,2	80,2	75,9	77,6	80,3	80,5	81,7	78,6	71,8	64,8	61,0	62,8	74,7
Temperatura (°C)		30,1	30,8	29,9	28,5	27,3	26,7	26,9	27,3	28,7	30,4	31,2	30,6	29,0
Precipitação (mm/mês)		27,4	27,0	135,3	15,8	3,0	1,0	9,9	0,0	0,0	10,0	11,4	92,8	333,6
Insolação (horas/dia)	1965	7,8	9,2	7,1	8,1	8,0	7,0	8,1	8,3	8,8	8,1	8,9	8,1	8,1
Evaporação (mm/mês)														
Velocidade do vento (m/s)		0,8	0,5	0,6	0,8	1,9	1,5	0,9	0,8	1,2	1,3	0,7	0,9	1,0
Umidade relativa do ar (%)		64,9	61,0	64,7	67,7	63,6	68,6	64,4	62,0	57,1	55,5	49,8	51,9	60,9
Temperatura (°C)		30,3	28,2	29,2	27,5	26,2	24,6	24,7	25,8	26,6	29,4	29,6	29,4	27,6
Precipitação (mm/mês)		42,9	120,4	50,1	227,0	23,2	9,0	13,0	0,0	2,2	0,0	26,2	62,0	576,0
Insolação (horas/dia)	1966	7,8	5,9	8,3	5,7	5,7	5,6	6,1	7,8	7,5	9,5	8,2	9,0	7,3
Evaporação (mm/mês)														
Velocidade do vento (m/s)		0,8	0,8	0,8	0,3	0,8	2,2	1,3	1,4	2,0	1,5	1,7	1,4	1,2
Umidade relativa do ar (%)		57,2	68,2	64,6	72,8	76,0	81,7	79,1	73,4	69,8	59,0	57,4	62,9	68,5

Continua...

Quadro 5B – Cont.

Temperatura (°C)		29,8	29,5	28,8	28,2	26,4	26,1	24,8	24,9	28,5	28,8	29,9	28,9		27,9
Precipitação (mm/mês)		28,8	15,0	139,1	57,4	46,5	9,0	8,0	5,4	18,0	0,0	2,0	146,9	476,1	
Insolação (horas/dia)	1967	10,9	3,6	8,6	7,3	6,2	7,0	6,8	7,2	9,4	8,9	9,9	7,4		7,8
Evaporação (mm/mês)															
Velocidade do vento (m/s)		1,1	1,0	1,0	1,2	1,8	2,0	1,9	1,9	1,1	1,2	2,1	1,1		1,5
Umidade relativa do ar (%)		60,5	63,2	64,5	67,1	72,3	71,8	73,8	69,1	59,8	59,2	59,8	64,4		65,5
Temperatura (°C)		29,8	29,5	27,7	28,5	26,4	24,4	24,3	25,0	27,9	29,8	30,5	30,7		27,9
Precipitação (mm/mês)		9,2	84,0	221,6	15,0	3,0	3,0	6,9	0,0	0,0	0,0	4,7	5,0	352,4	
Insolação (horas/dia)	1968	8,5	7,7	7,3	7,1	6,5	6,0	5,5	7,1	9,0	9,3	8,3	8,6		7,6
Evaporação (mm/mês)															
Velocidade do vento (m/s)		0,7	0,9	0,8	0,9	1,8	1,2	1,2	1,3	1,4	1,0	0,9	1,0		1,1
Umidade relativa do ar (%)		60,0	63,6	72,0	66,2	72,8	78,1	74,6	72,5	60,4	52,3	56,9	55,0		65,4
Temperatura (°C)		29,7	29,6	28,3	29,1	28,2	28,1	25,7	26,7	28,8	30,1	30,9	29,5		28,7
Precipitação (mm/mês)		36,8	122,0	198,1	0,0	9,0	0,0	42,8	1,0	0,0	0,0	0,0	15,4	425,1	
Insolação (horas/dia)	1969	7,9	7,3	6,5	7,6	7,8	7,5	6,3	9,0	9,1	9,8	10,4	7,5		8,1
Evaporação (mm/mês)															
Velocidade do vento (m/s)		1,2	0,9	0,9	1,2	1,0	1,3	1,8	1,5	1,0	1,2	1,2	1,3		1,2
Umidade relativa do ar (%)		62,2	62,0	70,0	62,6	67,9	66,0	73,3	68,2	67,2	59,8	54,6	62,8		64,7
Temperatura (°C)		29,3	29,5	29,3	29,9	27,7	26,7	24,9	25,6	27,6	29,9	29,8	30,0		28,3
Precipitação (mm/mês)		83,2	21,6	20,4	0,0	0,0	4,8	6,8	4,5	0,0	18,5	61,2	0,0	221,0	
Insolação (horas/dia)	1970	7,9	9,3	8,1	8,2	8,6	7,6	9,6	8,9	9,5	9,6	8,4	9,2		8,8
Evaporação (mm/mês)															
Velocidade do vento (m/s)		1,2	1,1	1,0	1,1	1,4	1,9	2,0	1,7	1,8	1,1	1,0	1,5		1,4
Umidade relativa do ar (%)		65,9	66,9	68,2	66,5	68,4	69,5	67,1	63,9	58,2	55,1	57,8	59,2		63,9
Temperatura (°C)		29,4	28,2	27,0	26,8	26,0	25,3	23,1	25,9	27,2	30,1	28,8	30,0		27,3
Precipitação (mm/mês)		42,4	167,8	262,6	183,0	14,2	2,6	22,0	4,1	0,0	9,9	19,6	36,6	764,8	
Insolação (horas/dia)	1974	7,8	8,0	7,3	6,2	6,3	5,9	4,6	7,3	7,5	9,9	8,2	9,4		7,4
Evaporação (mm/mês)															
Velocidade do vento (m/s)		3,6	2,9	2,0	1,9	4,1	5,2	5,1	5,3	6,3	4,7	3,9	3,4		4,0
Umidade relativa do ar (%)		56,8	62,7	72,0	73,1	72,6	67,8	73,1	59,4	53,1	46,2	55,9	48,5		61,8

APÊNDICE C

Quadro 1C – Valores médios das variáveis hidrológicas estudadas: precipitação média anual (P_m), vazão média anual de longa duração (Q_m), vazão específica média de longa duração (q_m), vazão mínima com sete dias de duração e período de retorno de 10 anos ($Q_{7,10}$), vazões associadas à permanência de 95% ($Q_{95\%}$), coeficiente de deságüe, área de drenagem e região fisiográfica de cada estação estudada, considerando-se os períodos de 1962 a 1976 e de 1979 a 2000

Período de 1962 a 1976													
Código	Estação	A_d (km^2)	P_m (mm)		Q_m ($m^3 s^{-1}$)		q_m ($L s^{-1} km^{-2}$)		$Q_{7,10}$ ($m^3 s^{-1}$)		$Q_{95\%}$ ($m^3 s^{-1}$)		Região fisiográfica
			Obs	Est	Obs	Est	Obs	Est	Obs	Est	Obs	Est	
41135000	Pirapora-Barreiro	61.880	1.326	1.317	752	743	12,2	12,0	225	217	237	230	Alto
43200000	São Romão	154.100	1.241	1.245	1.439	1.505	9,3	9,8	366	393	448	473	Médio
44200000	São Francisco	182.537	1.234	1.222	1.736	1.682	9,5	9,2	469	442	573	539	Médio
44500000	Manga	202.400	1.213	1.206	1.864	1.790	9,2	8,8	500	475	635	583	Médio
45298000	Carinhanha	251.209	1.161	1.168	1.987	2.012	7,9	8,0	552	551	654	682	Médio
45480000	Bom Jesus da Lapa	273.750	1.138	1.150	1.911	2.095	7,0	7,7	486	584	590	724	Médio
46150000	Ibotirama	325.200	1.089	1.110	2.327	2.244	7,2	6,9	686	653	888	811	Médio
46360000	Morpará	348.074	1.062	1.092	2.387	2.294	6,9	6,6	709	681	853	845	Médio
48020000	Juazeiro	510.800	970	964	2.428	2.485	4,8	4,9	847	837	1.041	1.011	Submédio
49660000	Traipu	622.600	901	876	2.595	2.577	4,2	4,1	889	899	1.029	1.049	Baixo
Período de 1979 a 2000													
Código	Estação	A_d (km^2)	P_m (mm)		Q_m ($m^3 s^{-1}$)		q_m ($L s^{-1} km^{-2}$)		$Q_{7,10}$ ($m^3 s^{-1}$)		$Q_{95\%}$ ($m^3 s^{-1}$)		Região fisiográfica
			Obs	Est	Obs	Est	Obs	Est	Obs	Est	Obs	Est	
41135000	Pirapora-Barreiro	61.880	1.391	1380	938	979	15,2	15,8	460	453	504	502	Alto
43200000	São Romão	154.100	1.298	1300	1.817	1.806	11,8	11,7	611	640	754	741	Médio
44200000	São Francisco	182.537	1.283	1275	2.160	2.007	11,8	11,0	729	682	842	796	Médio
44500000	Manga	202.400	1.257	1258	2.136	2.132	10,6	10,5	624	709	731	832	Médio
45298000	Carinhanha	251.209	1.200	1215	2.334	2.387	9,3	9,5	839	770	950	913	Médio
45480000	Bom Jesus da Lapa	273.750	1.167	1195	2.344	2.479	8,6	9,1	857	795	960	947	Médio
46150000	Ibotirama	325.200	1.136	1151	2.591	2.629	8,0	8,1	788	849	1.002	1.019	Médio
46360000	Morpará	348.074	1.105	1131	2.710	2.669	7,8	7,7	878	871	1.068	1.049	Médio
48020000	Juazeiro	510.800	1.001	989	2.558	2.558	5,0	5,0	1.273	1.273	1.442	1.442	Submédio
49660000	Traipu	622.600	918	891	2.558	2.558	4,1	4,1	1.411	1.411	1.538	1.538	Baixo

APÊNDICE D

Quadro 1D – Evaporação (mm) no lago de Sobradinho obtida pelo tanque Classe A (ECA C=0,6) e pelos modelos CRLE, Linacre e Kohler et al.

Mês/ Modelos	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Total
ECA C=0,6													
1980	138,8	91,9	135,2	176,4	187,9	178,4	185,4	229,7	224,5	182,2	201,6	213,5	2145,4
1984	218,6	230,9	185,6	137,0	148,4	151,2	194,4	218,0	216,2	260,0	249,5	247,2	2456,9
1985	128,0	143,1	147,7	104,6	120,0	118,1	154,2	175,8	207,0	214,6	223,9	127,6	1864,5
1986	195,3	157,9	133,9	156,6	171,1	176,4	176,0	195,7	223,6	205,3	201,2	166,5	2159,5
1987	196,8	203,3	112,0	141,1	133,5	141,8	170,0	177,3	200,0	220,2	214,9	193,4	2104,4
1988	171,3	197,3	131,9	149,0	127,8	118,3	139,9	186,4	202,0	195,5	209,7	149,0	1978,0
1989	170,0	176,4	162,4	158,8	134,5	133,4	138,9	169,4	191,3	221,5	169,0	105,8	1931,5
1991	136,2	140,8	155,7	150,3	143,6	126,9	156,8	169,3	226,6	282,9	176,9	171,3	2037,2
1992	149,7	114,0	174,1	165,8	168,5	142,7	151,2	170,7	178,7	209,6	201,2	169,4	1995,8
1994	186,0	126,0	106,0	140,4	157,5	126,0	130,2	167,8	179,6	185,6	197,5	185,4	1888,1
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	133,0	103,2	106,6	99,1	121,0	145,5	164,6	181,8	174,1	178,9	191,6	1731,6
1999	204,4	159,1	159,0	169,2	154,2	154,0	162,5	198,4	185,7	270,6	180,3	139,9	2137,3
Média	168,1	157,1	140,5	145,8	145,8	141,0	157,8	183,6	201,0	217,5	196,8	170,9	2025,7
CRLE													
1980	164,2	143,1	175,4	168,4	146,5	129,6	140,4	139,6	183,1	194,0	192,7	159,8	1936,8
1984	177,6	150,7	140,2	128,1	100,6	81,9	87,4	111,8	137,5	173,8	188,8	201,1	1679,5
1985	129,2	173,3	160,2	129,4	124,8	111,0	117,4	137,5	175,2	166,7	167,3	129,3	1721,1
1986	171,0	166,1	148,9	151,8	136,6	120,3	113,5	145,0	164,8	190,5	180,4	172,3	1861,2
1987	186,1	192,5	137,4	150,2	116,3	118,4	130,4	147,3	175,8	189,3	182,9	175,8	1902,4
1988	167,9	188,5	152,8	145,6	129,5	107,0	111,1	142,5	159,7	166,7	169,8	144,0	1785,0
1989	161,8	141,6	159,8	149,9	112,8	117,3	108,3	140,3	166,1	183,5	162,1	173,8	1777,2
1991	154,3	186,0	161,4	158,8	124,1	110,9	114,3	122,0	128,2	171,8	152,3	168,8	1753,1
1992	128,8	140,4	159,4	148,8	139,0	122,7	114,0	136,8	174,9	186,2	181,3	146,7	1779,0
1994	190,8	159,5	151,5	139,5	129,9	104,4	115,3	144,5	151,3	172,9	176,4	179,3	1815,2
1996	180,8	188,5	161,7	143,6	130,1	117,0	121,9	142,9	168,1	164,5	154,5	174,8	1848,5
1997	148,1	179,1	129,4	144,4	104,0	119,0	114,2	138,3	171,1	181,3	68,1	189,0	1686,1
1999	176,6	185,4	166,6	161,8	120,2	107,8	125,5	128,3	158,7	160,2	142,4	168,9	1802,5
Média	164,4	168,8	154,2	147,7	124,2	112,8	116,4	136,7	162,7	177,0	163,0	168,0	1796,0
Linacre													
1980	143,9	103,3	187,2	169,2	183,1	161,6	173,9	197,1	231,2	288,5	252,2	194,9	2286,2
1984	224,9	189,4	120,8	117,4	148,2	136,8	146,1	160,6	176,1	191,8	146,8	189,1	1947,9
1985	129,9	130,9	122,3	115,4	115,5	121,2	168,4	204,8	227,1	251,0	189,6	142,0	1918,0
1986	229,9	133,8	129,0	160,5	179,0	182,4	189,0	220,4	259,3	244,5	238,4	208,4	2374,5
1987	220,0	217,5	111,7	164,0	161,2	175,3	194,5	221,1	258,3	267,5	215,9	205,2	2412,2
1988	167,1	190,2	138,5	118,8	172,2	130,7	172,9	221,6	249,4	225,0	193,7	139,3	2119,4
1989	193,0	195,8	145,7	202,8	160,6	142,4	175,3	205,0	232,3	271,2	174,4	90,4	2188,9
1991	177,7	142,5	130,1	155,3	155,2	162,0	181,1	202,7	223,3	268,9	165,9	211,1	2175,8
1992	132,7	165,3	219,6	165,0	183,1	171,5	178,1	204,5	228,4	248,9	171,4	159,0	2227,4
1994	142,8	149,5	113,5	183,3	179,5	162,8	172,4	199,3	231,1	243,0	210,0	176,2	2163,3
1996	235,4	170,3	135,5	145,5	169,1	149,5	167,5	190,8	216,9	223,8	136,8	179,2	2120,2
1997	151,1	150,4	117,1	111,9	154,7	147,4	163,7	188,5	207,3	180,5	192,1	200,1	1964,7
1999	168,8	148,4	120,1	194,9	195,1	155,7	177,0	187,6	183,3	235,8	141,1	130,4	2038,1
Média	178,2	160,5	137,8	154,1	165,9	153,8	173,8	200,3	224,9	241,6	186,8	171,2	2149,0

Continua...

Quadro 1D – Cont.

Kohler et al.													
1980	132,4	88,5	153,5	159,2	149,8	128,1	143,5	160,0	185,1	242,8	197,3	164,6	1904,8
1984	188,6	145,8	123,2	106,5	95,1	74,6	99,7	111,4	141,9	224,9	239,5	252,4	1803,6
1985	107,7	142,9	142,3	100,2	107,3	100,5	132,9	163,8	193,7	196,9	189,6	115,5	1693,3
1986	179,5	146,6	132,2	151,1	159,1	148,7	144,3	191,9	228,0	244,4	228,5	205,8	2160,1
1987	218,2	219,4	120,8	146,9	120,3	135,5	169,0	195,9	235,3	248,7	214,5	203,7	2228,2
1988	174,9	204,2	132,8	132,4	133,4	106,8	132,3	191,9	213,8	206,2	203,1	129,8	1961,6
1989	171,7	138,9	154,9	151,3	115,1	131,9	121,1	176,0	199,4	238,8	168,6	142,4	1910,1
1991	148,7	173,0	154,9	156,3	134,2	115,5	139,2	144,0	150,1	232,9	154,6	201,0	1904,4
1992	121,0	106,0	164,5	145,1	161,9	139,1	131,4	166,3	213,1	221,1	181,1	137,0	1887,8
1994	179,1	137,6	123,4	129,8	139,9	109,2	125,3	173,6	182,4	203,2	186,8	185,6	1875,9
1996	189,0	177,5	143,7	124,8	129,1	112,8	133,9	159,1	189,5	199,5	150,4	181,8	1891,0
1997	133,2	161,5	105,2	121,9	87,5	110,3	120,0	158,7	193,9	205,7	92,3	211,3	1701,4
1999	180,7	173,9	154,5	167,1	119,4	112,0	141,5	138,1	175,3	173,6	137,1	158,3	1831,3
Média	163,4	155,1	138,9	137,9	127,1	117,3	133,4	163,9	192,4	218,4	180,3	176,1	1904,1

APÊNDICE E

Quadro 1E – Evaporação líquida (mm) no lago de Sobradinho obtida pelo tanque Classe A (ECA C=0,6) e pelos modelos CRLE, Linacre e Kohler et al., considerando-se o período de 1980 a 1999

Modelos	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Maió	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Total
ECA C=0,6	92,2	68,4	10,3	48,8	119,6	127,6	144,2	180,6	195,1	200,1	158,4	106,2	1451,5
CRLE	88,5	80,1	24,0	50,8	98,0	99,4	102,8	133,7	156,7	159,7	124,7	103,2	1221,7
Linacre	102,4	71,8	7,6	57,2	139,7	140,4	160,2	197,3	219,0	224,2	148,4	106,4	1574,7
Kohler	87,6	66,4	8,7	41,0	100,9	103,9	119,8	160,9	186,5	201,0	141,9	111,4	1329,9

APÊNDICE F

Quadro 1F – Áreas médias mensais (km²) do reservatório de Sobradinho no período de operação do reservatório de 1979 a 2000

Mês/Ano	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Média
1979	3808	3827	4534	4246	4163	4133	4089	3957	3758	3545	3424	3388	3906
1980	3398	3575	4452	4402	4046	3877	3799	3685	3556	3434	3368	3459	3754
1981	3377	3465	3673	4079	4104	4026	3902	3735	3569	3415	3450	3732	3711
1982	3573	3403	3596	3918	4074	3899	3896	3837	3714	3557	3301	3096	3655
1983	3191	3526	3828	4113	4134	4143	4118	4009	3845	3629	3649	3622	3817
1984	3630	3818	3833	4061	4139	3954	3714	3434	3136	2809	2530	2433	3458
1985	2783	3422	4032	4186	4197	4111	3957	3760	3513	3310	3195	3328	3649
1986	3570	3730	3979	4067	3957	3733	3492	3227	2931	2611	2296	2037	3302
1987	2070	2081	2175	2517	2651	2596	2524	2385	2173	1900	1613	1611	2192
1988	2348	2658	2910	2996	2917	2762	2592	2378	2000	1749	1751	1854	2410
1989	2305	2466	2618	2752	2613	2460	2356	2226	2056	1885	1830	2183	2313
1990	3311	4115	4220	4213	4126	3964	3809	3647	3390	3156	2985	2929	3656
1991	2915	3324	3685	4081	4189	4128	3900	3661	3439	3221	3053	3256	3571
1992	3557	3541	4123	4216	4206	4112	3982	3778	3566	3386	3413	3681	3797
1993	3648	4048	4172	4161	4034	3836	3594	3280	2945	2614	2368	2285	3415
1994	2708	3442	3799	4197	4156	3996	3650	3306	2926	2548	2193	2141	3255
1995	2449	2550	2694	2824	2831	2714	2573	2386	2138	1918	1803	1963	2404
1996	2483	2661	2615	2647	2638	2422	2232	2065	1918	1764	1659	1876	2248
1997	2318	3029	3325	3885	4185	4185	4105	3972	3785	3570	3437	3458	3605
1998	3701	3899	4109	4044	3729	3518	3307	3022	2695	2317	2080	2318	3228
1999	2628	2650	2739	3000	2775	2593	2370	2128	1885	1711	1555	1632	2306
2000	2063	2508	2933	3225	3148	2992	2798	2600	2354	2050	1839	2090	2550
Média	2993	3261	3548	3720	3682	3553	3398	3204	2968	2732	2582	2653	3191