

CLÍVIA DIAS COELHO

**ESTIMATIVAS DA EVAPORAÇÃO E DA PEGADA HÍDRICA DOS
RESERVATÓRIOS DAS USINAS HIDRELÉTRICAS DE TUCURUÍ-PA E
LAJEADO-TO**

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

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2016

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

T

C672e
2016
Coelho, Clívia Dias, 1990-
Estimativas da evaporação e da pegada hídrica dos
reservatórios das usinas hidrelétricas de Tucuruí-PA e
Lajeado-TO / Clívia Dias Coelho. – Viçosa, MG, 2016.
xvii, 91f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui apêndices.

Orientador: Demetrius David da Silva.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f.76-83.

1. Evaporação - Estimativas. 2. Recursos hídricos.
3. Água - Uso. 4. Usinas hidroelétricas. I. Universidade Federal
de Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de
Pós-graduação em Engenharia Agrícola. II. Título.

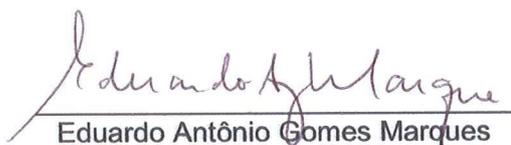
CDD 22. ed. 551.572

CLÍVIA DIAS COELHO

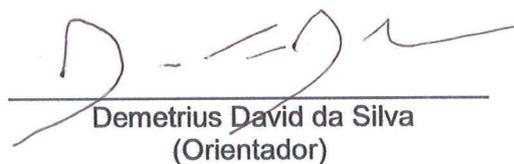
**ESTIMATIVAS DA EVAPORAÇÃO E DA PEGADA HÍDRICA DOS
RESERVATÓRIOS DAS USINAS HIDRELÉTRICAS DE TUCURUÍ-PA E
LAJEADO-TO**

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

APROVADA: 19 de fevereiro de 2016


Eduardo Antônio Gomes Marques


Silvio Bueno Pereira
(Coorientador)


Demetrius David da Silva
(Orientador)

“O mundo de Deus é grande,
Deus traz numa mão fechada.
O pouco com Deus é muito
e o muito sem Deus é nada.”
(Domínio popular)

Aos meus pais, Danilo e Irlene,
minhas maiores inspirações,
dedico.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter guiado meus caminhos e me dado luz e serenidade para enfrentar todos os desafios.

Aos meus pais, Danilo José da Silva Coelho e Irlene Maria Dias Coelho, pelo incentivo, amor, carinho e dedicação incondicionais, e por serem meus maiores exemplos de luta e determinação.

Ao meu irmão, Breno, pelo amor e companheirismo em todos os momentos.

À minha avó Aparecida pelo incentivo, carinho e orações.

A toda minha família, que me apoiou e torceu por mim durante essa jornada.

Ao Cristiano, pelo companheirismo e carinho em todos os momentos.

Às minhas amigas Fernanda e Agnes, por entenderem as dificuldades da pós-graduação e me apoiarem e incentivarem sempre.

Aos amigos da EAB e aos amigos viçosenses, que, mesmo longe, sonharam este sonho junto comigo.

Aos amigos da Cordão de Ouro Viçosa, que compartilharam comigo tantos momentos de alegria, trazendo leveza aos meus dias.

Ao professor Demetrius David da Silva, pela paciência, atenção e confiança ao longo destes anos e pela valiosa orientação na condução deste trabalho.

Aos professores e coorientadores Michel Castro Moreira e Gilberto Chohaku Sedyama, pelas ideias, críticas e sugestões no desenvolvimento desta pesquisa.

Aos membros da banca, professores Eduardo Antônio Gomes Marques e Silvio Bueno Pereira, pelas contribuições fundamentais à dissertação.

À Universidade Federal de Viçosa, por intermédio do Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realização deste curso.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (Fapemig), pela concessão da bolsa de estudo.

Aos professores e aos funcionários do Departamento de Engenharia Agrícola, pela dedicação e auxílio durante a realização deste curso.

A Nayara pela imensa ajuda e orientação nos primeiros passos desta pesquisa

Aos amigos de pós-graduação do Centro de Referência em Recursos Hídricos, em especial Micael, Rafael, Marina e Luna, por dividirem as dificuldades e conquistas.

À ELETRONORTE, INVESTCO e INMET por terem disponibilizado os dados para realização da pesquisa.

E a todos que de alguma formam contribuíram para que eu chegasse até aqui, o meu muito obrigado.

BIOGRAFIA

Clívia Dias Coelho, filha de Danilo José da Silva Coelho e Irlene Maria Dias Coelho, nasceu em Teófilo Otoni, MG, em 15 de fevereiro de 1990.

Em março de 2008, ingressou no curso de Engenharia Ambiental na Universidade Federal de Viçosa (UFV), em Viçosa, MG, concluindo-o em setembro de 2013. Durante a graduação, foi bolsista de Iniciação Científica por um ano pelo programa PIBIC/CNPq, bolsista de monitoria em Química Analítica por dois anos e bolsista do programa de graduação sanduíche CAPE/FIPSE, cursando um período letivo na University of Georgia (UGA), em Athens, Georgia (EUA).

Em março de 2014, ingressou no Programa de Pós Graduação, em nível de Mestrado, no Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa (UFV), na área de concentração em Recursos Hídricos e Ambientais, submetendo-se à defesa de dissertação em fevereiro de 2016.

ÍNDICE

LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS.....	x
LISTA DE SÍMBOLOS	xi
RESUMO	xiv
ABSTRACT	xvi
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVO.....	5
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
3.1 Estimativa da evaporação da água em superfícies livres	6
3.1.1 Método de Penman.....	7
3.1.2 Método de Linacre	10
3.1.3 Método de Kohler et al.	11
3.1.4 Método de Morton (CRLE)	12
3.1.5 Método de deBruin-Keijman.....	17
3.2 Pegada hídrica.....	18
3.2.1 Pegada hídrica de usinas hidrelétricas.....	20
4. MATERIAL E MÉTODOS	25
4.1 Caracterização da área de estudo	25
4.2 Base de dados climáticos.....	29
4.3 Estimativa da evaporação da água nos reservatórios	32
4.3.1 Método de Penman.....	32
4.3.2 Método de Linacre	35
4.3.3 Método de Kohler et al.	36
4.3.4 Método de Morton (CRLE)	37
4.3.5 Método de deBruin-Keijman.....	43
4.3.6 Comparação entre os métodos de estimativa da evaporação	43

4.4	Obtenção da vazão média evaporada nos reservatórios.....	44
4.5	Estimativa da pegada hídrica dos reservatórios.....	47
4.5.1	PH-1: uso consuntivo da água.....	48
4.5.2	PH-2: uso consuntivo líquido.....	48
4.5.3	PH-3: balanço de água líquido.....	48
4.6	Análise da eficiência hídrica dos reservatórios.....	49
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	51
5.1	Evaporação no reservatório de Tucuruí.....	51
5.1.1	Evaporação anual no reservatório de Tucuruí.....	51
5.1.2	Evaporação mensal no reservatório de Tucuruí.....	53
5.2	Evaporação no reservatório de Lajeado.....	57
5.2.1	Evaporação anual no reservatório de Lajeado.....	57
5.2.2	Evaporação mensal no reservatório de Lajeado.....	59
5.3	Vazão evaporada nos reservatórios de Tucuruí e Lajeado.....	63
5.4	Pegada hídrica das usinas hidrelétricas.....	64
5.4.1	Pegada hídrica da UHE de Tucuruí.....	64
5.4.2	Pegada hídrica da UHE de Lajeado.....	67
5.4.3	Comparação entre as pegadas hídricas das UHEs de Tucuruí e Lajeado...	69
6.	CONCLUSÕES.....	74
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	76
	APÊNDICES.....	84

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Representação esquemática da relação complementar entre evapotranspiração potencial e espacial com suprimento constante de energia radiante. Fonte: Adaptado de Morton (1983a).....	13
Figura 2: Representação esquemática da relação entre as evaporações do lago (EW) e potencial (EP) no ambiente de terrestre com constante fornecimento de energia radiante. Fonte: Adaptado de Morton (1983a).....	14
Figura 3: Localização do reservatório da hidrelétrica de Tucuruí.	26
Figura 4: Localização do reservatório da hidrelétrica de Lajeado.	28
Figura 5: Comportamento climatológico das estações Tucuruí e Palmas: (a)precipitação; (b)temperatura média; (c)insolação; e (d) velocidade do vento.	31
Figura 6: Geração média mensal de energia elétrica das UHEs de Tucuruí e Lajeado.	47
Figura 7: Evaporação média mensal no reservatório de Lajeado.	54
Figura 8: Evaporação média mensal no reservatório de Lajeado.	59
Figura 9: Pegada hídrica da UHE de Tucuruí para as metodologias PH-1, PH-2 e PH-3 calculadas a partir das taxas de evaporação estimadas pelo método de Penman.	66
Figura 10: Pegadas hídricas da UHE de Lajeado calculadas a partir das taxas de evaporação estimadas pelo método de Penman.....	68
Figura 11: Pegada hídrica da UHEs de Tucuruí e Lajeado calculadas pelo método PH-1.....	69
Figura 12: Pegada hídrica da UHEs de Tucuruí e Lajeado calculadas pelo método PH-2.....	71
Figura 13: Pegada hídrica da UHEs de Tucuruí e Lajeado calculadas pelo método PH-3.....	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Pegada Hídrica de fontes primárias de energia	22
Tabela 2: Pegada hídrica de hidrelétricas do Brasil	23
Tabela 3: Características das UHEs de Tucuruí e Lajeado.	28
Tabela 4: Evapotranspiração real nas regiões dos reservatórios de Tucuruí e Lajeado antes da sua formação, segundo o balanço hídrico de Thornthwaite & Mather (1955).	46
Tabela 5: Evaporação média anual para o reservatório de Tucuruí	51
Tabela 6: Análise de variância dos métodos de estimativa da evaporação anual no reservatório de Tucuruí	51
Tabela 7: Análise de variância dos métodos de estimativa da evaporação mensal no reservatório de Tucuruí	55
Tabela 8: Evaporação média mensal em mm para o reservatório de Tucuruí	55
Tabela 9: Evaporação média anual para o reservatório de Lajeado	57
Tabela 10: Análise de Variância dos métodos de estimativa da evaporação anual no reservatório de Lajeado	58
Tabela 11: Análise de Variância dos métodos de estimativa da evaporação mensal no reservatório de Lajeado.....	60
Tabela 12: Evaporação média mensal em mm para o reservatório de Lajeado	60
Tabela 13: Vazão média anual evaporada nos reservatórios de Tucuruí e Lajeado.	63
Tabela 14: Vazão líquida média anual evaporada nos reservatórios de Tucuruí e Lajeado	64
Tabela 15: Estimativa da Pegada Hídrica média anual para o reservatório de Tucuruí	65
Tabela 16: Estimativas da pegada hídrica média anual para o reservatório de Lajeado	67

LISTA DE SÍMBOLOS

ξ = fator de estabilidade, adimensional.

λ = calor latente de vaporização, MJ/kg.

η = raio vetor do sol, adimensional.

E_P = evaporação potencial, mm/mês.

E_R = evaporação do reservatório, m/ano, m/dia, mm/mês, mm/dia.

E_a = poder evaporante do ar, mm/dia.

G_0 = radiação solar na condição de céu claro, W/m².

G_E = radiação solar no topo da atmosfera, W/m².

P_a = volume anual de precipitação que cai sobre o reservatório, m³/ano.

P_m = precipitação média mensal, mm.

P_s = pressão atmosférica ao nível do mar, mb.

Q_{ET} = vazão evapotranspirada a partir da vegetação antecedente que teria ocorrido na ausência da barragem, m³/ano.

Q_{EV} = vazão evaporada no reservatório, m³/s, m³/ano.

R_{TP} = saldo de radiação na temperatura de equilíbrio, W/m².

R_a = radiação solar incidente no topo da atmosfera, MJ/(m² dia), W/m².

R_n = saldo diário de radiação medido sobre a superfície de água livre, W/m², MJ/(m² dia), mm/dia.

R_{nl} = saldo de radiação de onda longa, MJ/(m² dia).

R_{ns} = saldo de radiação de onda curta, MJ/(m² dia).

R_s = radiação solar incidente na superfície do reservatório, MJ/(m² dia), W/m², J/(cm² dia).

R_{so} = radiação solar sem nebulosidade, MJ/(m² dia).

R_w = saldo de radiação à temperatura do ar, W/m².

T_p = conjunto de valores de T_p no processo iterativo.

T_p = temperatura de equilíbrio da subcamada de ar próximo à superfície, °C.

T_d = temperatura média mensal do ponto de orvalho, °C.

T_{max} = temperatura máxima do ar, °C.

T_{maxK} = temperatura máxima do ar em Kelvin, K.

T_{min} = temperatura mínima do ar, °C.

T_{minK} = temperatura mínima do ar em Kelvin, K.

α_0 = albedo para dia de céu claro, adimensional.

e_a = pressão parcial de vapor d'água no ar à temperatura do ar, mbar, kPa.

$e^o(T)$ = pressão de saturação de vapor d'água no ar à temperatura T, kPa.

e_s = pressão de saturação de vapor d'água no ar à temperatura do ar, mbar, kPa.

f_w = coeficiente de transferência de vapor, adimensional.

f_z = constante para cálculo da evaporação em reservatórios igual a 25,0 W/(m² mbar).

u_2 = velocidade do vento a 2 metros de altura, m/s.

u_p = velocidade do vento a 15,2 cm de altura acima do Tanque Classe A, km/dia.

w_s = ângulo horário de nascer ou pôr do sol, radianos.

γ_l = constante psicométrica corrigida, kPa/°C.

λ_c = coeficiente de transferência de calor.

τ_a = fração da transmitância absorvida na condição de céu claro, W/m².

v_p = pressão de saturação de vapor na temperatura de equilíbrio, mbar.

v_D = pressão de saturação de vapor na temperatura do ponto de orvalho, mbar.

Δ = declividade da curva de pressão de saturação do vapor d'água, kPa/°C.

Δ_p = declividade da curva de pressão de vapor de saturação na temperatura de equilíbrio, mbar/°C.

h = altitude do local, m.

ρ = peso específico da água, kg/m³.

A = área do reservatório, m².

B = perda de radiação de ondas longas pela superfície solo-planta na temperatura do ar, W/m².

C = média do número de décimos do céu ocupado por nuvens no momento da observação, adimensional.

ET = evapotranspiração real ou regional, mm/mês.

ETP = evapotranspiração potencial, mm/mês.

ETW = evapotranspiração de equilíbrio, mm/mês.

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

G = radiação global incidente, W/m².

GE = geração anual de energia da usina hidrelétrica, GJ/ano.

J = dia Juliano, adimensional.

N = fotoperíodo, horas.

P = pressão atmosférica, kPa, mbar.

PH = Pegada Hídrica, m^3/GJ .

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

T = temperatura média do ar, $^{\circ}C$.

UR = umidade relativa do ar, %.

W = vapor de água precipitável, mm.

Z = ângulo zenital ao meio-dia, radianos.

dr = distância relativa Terra-sol, adimensional.

i = número do mês do ano.

j = coeficiente de turbidez, adimensional.

n = número de horas de insolação, horas.

z = ângulo zenital médio diário, radianos.

α = albedo médio, adimensional

γ = constante psicométrica, $kPa/^{\circ}C$.

δ = declinação solar, adimensional.

δT_p = correção de T'_p no processo iterativo.

θ = a declinação do sol, radianos.

ρ_r = incremento na radiação atmosférica devido às nuvens, adimensional.

σ = constante de Stefan-Boltzmann, $4,903 \times 10^{-4} MJ K^{-4} m^{-2} dia^{-1}$.

τ = transmitância do céu claro para a radiação solar direta, adimensional.

v = pressão de saturação de vapor à temperatura média do ar, mbar.

φ = latitude, radianos.

ω = deslocamento angular da terra do nascer-do-sol ao meio-dia, radianos.

RESUMO

COELHO, Clívia Dias, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2016. **Estimativas da evaporação e da pegada hídrica dos reservatórios das usinas hidrelétricas de Tucuruí-PA e Lajeado-TO.** Orientador: Demetrius David da Silva. Coorientadores: Gilberto Chohaku Sedyama, Silvio Bueno Pereira e Michel Castro Moreira.

As perdas de água em reservatórios hidrelétricos por evaporação tem grande influência no volume disponível para os múltiplos usos e na garantia de atendimento das demandas de água. Nesse contexto, a pegada hídrica de hidrelétricas, um indicador calculado pela relação entre o consumo de água de usinas hidrelétricas e a energia produzida, fornece uma base para a discussão sobre a alocação da água e as questões relacionadas ao seu uso sustentável, equitativo e eficiente. Estimativas atualizadas e precisas da evaporação em reservatórios hidrelétricos brasileiros são, portanto, fundamentais para o melhor gerenciamento dos recursos hídricos. Dessa forma, o objetivo do presente trabalho foi estimar a evaporação, a partir da aplicação dos métodos de Penman (1948), Linacre (1993), Kohler et al. (1955), Morton (1983a) e deBruin & Keijman (1979), nos reservatórios de Tucuruí-PA e de Lajeado-TO; e caracterizar a pegada hídrica das Usinas Hidrelétricas de Tucuruí e Lajeado com base na sua produção de energia elétrica e taxas de evaporação mensais e anuais. Foram utilizados dados climatológicos mensais, obtidos das estações meteorológicas de Tucuruí (OMM: 82361) e de Palmas (OMM: 83033), fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) e dados de geração mensal de energia elétrica, fornecidos pelas empresas Eletronorte e Investco. A comparação entre os diferentes métodos foi realizada utilizando-se como padrão o método de Penman, sendo analisada a variância e os testes de Dunnett e Tukey. A partir dos valores estimados de taxa de evaporação nos reservatórios foi possível obter a vazão equivalente à lâmina evaporada e a vazão evaporada líquida nas bases anual e mensal. A pegada hídrica das hidroelétricas foi avaliada por três métodos. O primeiro método (PH-1) considera somente o consumo bruto de água pelo sistema de geração de energia hidrelétrica, enquanto o segundo método (PH-2) considera o consumo líquido de água, e o terceiro método (PH-3) contabiliza o balanço líquido de água. Os resultados permitiram constatar que as evaporações médias anuais nos reservatórios de Tucuruí e Lajeado, estimadas pelo método de Penman, foram similares, com valores de 1.784 mm e 1.882 mm, respectivamente.

Os métodos de Linacre; Kohler et al.; Morton e deBruin & Keijman não podem ser utilizados para a estimativa da evaporação média anual nos reservatórios de Tucuruí e Lajeado em substituição ao método de Penman. Os métodos de Linacre e deBruin & Keijman apresentaram comportamento similar ao de Penman para o período mais seco do ano em Tucuruí, podendo ser utilizados para a estimativa da evaporação mensal do reservatório neste período. As vazões médias anuais evaporadas nos reservatórios de Tucuruí e Lajeado, estimadas pelo método de Penman, foram de 163 m³/s e 38 m³/s, o que corresponde a 1,5% e 1,6% da vazão natural média do rio Tocantins nas respectivas localidades. Já as vazões líquidas médias anuais evaporadas nos reservatórios de Tucuruí e Lajeado foram de 69 m³/s e 16 m³/s, o que corresponde a 0,6% e 0,7% da vazão natural média do rio Tocantins nas respectivas localidades. As estimativas da pegada hídrica média anual para o reservatório de Tucuruí, pelos métodos PH-1, PH-2 e PH-3 foram de, respectivamente, 49 m³/GJ, 26 m³/GJ e -21 m³/GJ, enquanto para Lajeado as estimativas foram de 95 m³/GJ, 48 m³/GJ e 21 m³/GJ. A média da área do reservatório por unidade de capacidade instalada da hidrelétrica de Tucuruí foi de 34 ha/MW, enquanto para Lajeado o valor foi de 70 ha/MW. Considerando as estimativas de pegada hídrica, Tucuruí apresentou maior eficiência hídrica em relação à Lajeado devido à menor razão entre a superfície do seu reservatório e a sua capacidade hidroelétrica instalada.

ABSTRACT

COELHO, Clívia Dias, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, february of 2016. **Evaporation and water footprint estimates from the Tucuruí-PA and Lajeado-TO hydropower plants reservoirs.** Adviser: Demetrius David da Silva. Co-advisers: Gilberto Chohaku Sediayama, Silvio Bueno Pereira and Michel Castro Moreira.

Knowledge of the evaporative losses in hydroelectric reservoirs has great influence in determining the volume of water available for multiple uses and ensuring compliance with the demands of water. In this context, the water footprint of hydropower, an indicator calculated by the ratio of water consumption of hydropower plants and the energy produced, provides a basis for discussion on the allocation of water and issues related to sustainable, fair and efficient use. More updated and accurate estimates of evaporation in Brazilian hydroelectric reservoirs are therefore extremely important to a better management of water resources. Thus, the aim of this study was to estimate evaporation based on the application of mathematical methods proposed by Penman (1948), Linacre (1993), Kohler et al. (1955), Morton (1983a) and deBruin & Keijman (1979), in the reservoirs of Tucuruí-PA and Lajeado-TO; and characterize the water footprint of hydropower plants of Tucuruí and Lajeado based on their production of electricity and monthly and annual evaporation rates. Climatological data were obtained from the meteorological stations of Tucuruí (OMM: 82,361) and Palmas (WMO: 83033), provided by the Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), and monthly power generation data were provided by Eletronorte and Investco companies. The comparison between the different methods was performed by using Penman as the standard method, and analyzing the variance and Dunnett and Tukey tests. From the estimated values of evaporation rate in the reservoirs, it was possible to obtain the evaporated discharge and the net evaporated discharge the annual and monthly basis. The water footprints of the hydroelectric power plants were evaluated by three different methods. The first method (PH-1) considered only the gross consumption of water by the hydroelectric power generation system, the second method (PH-2) considers the net water consumption, while the third method (PH-3) accounts the net water balance. The results demonstrated that the average annual evaporation in Tucuruí and Lajeado reservoirs, estimated by the standard method, were similar, and correspond, respectively, to 1.784 mm and 1.882 mm, respectively. Linacre; Kohler et al.; Morton and Bruin & Keijman methods cannot be used to estimate the average annual

evaporation in Tucuruí and Lajeado reservoirs in substitution of the Penman method. Linacre and deBruin & Keijman methods exhibit similar behavior to Penman in the driest period of the year for Tucuruí and can be used for the estimation of monthly evaporation from the reservoir in this period. The average annual evaporated discharges in Tucuruí and Lajeado reservoirs, estimated by Penman method, were 163 m³/s and 38 m³/s, respectively, which corresponds to 1,5% and 1,6% of the average natural discharge of the Tocantins river in the respective localities. However, the average annual net evaporated discharges in Tucuruí and Lajeado reservoirs were 69 m³/s and 16 m³/s, which corresponds to 0,6% and 0,7% of the average natural flow of the river Tocantins in the respective localities. Estimates of the average annual water footprint for Tucuruí reservoir, by PH-1, PH-2 and PH-3 methods were, respectively, 49 m³/GJ, 26 m³/GJ and -21 m³/GJ, while for Lajeado these estimates were 95 m³/GJ, 48 m³/GJ and 21 m³/GJ. The average reservoir area per unit of installed capacity for Tucuruí dam was 34 ha/MW, while for Lajeado this value was 70 ha/MW. Considering the water footprint estimates, Tucuruí has showed greater water efficiency in relation to Lajeado due to the lower ratio between the surface of its reservoir and its installed hydroelectric capacity.

1. INTRODUÇÃO

O conhecimento da perda de água por evaporação de uma superfície natural é de suma importância para os diferentes campos do conhecimento científico, especialmente nas aplicações da Meteorologia e da Hidrologia (ONS, 2004), bem como na gestão e planejamento de recursos hídricos. No atual contexto de escassez de água e energia, há também uma crescente preocupação com a sustentabilidade hídrica das usinas hidrelétricas, levando à necessidade de estudos mais aprofundados sobre a relação entre água e hidroeletricidade (HERATH et al., 2011; LIU et al., 2015).

Nos estudos de planejamento da operação e expansão energética, os dados de evaporação são utilizados de duas formas principais: nos estudos de simulação de operação de reservatórios; e nos estudos para obtenção das séries de vazões naturais nos locais de aproveitamentos hidrelétricos. O volume perdido por evaporação nos reservatórios se traduz, de forma linear, em perda energética nas usinas hidrelétricas (ONS, 2004).

A água é fundamental para a produção de energia: na geração elétrica, na extração, no transporte e no tratamento do petróleo, do gás e do carvão e, cada vez mais, na irrigação para as culturas destinadas à produção de biocombustíveis. Estima-se que a extração de água para a produção de energia tenha sido de 583 bilhões de metros cúbicos em 2010. Desse total, o consumo de água (volume extraído e não devolvido à fonte) foi de 66 bilhões de metros cúbicos (IEA, 2012).

Segundo IEA (2012), a água é cada vez mais importante enquanto critério de avaliação da viabilidade dos projetos de energia, à medida que o crescimento da população e da economia intensifica a competição por recursos hídricos. Em certas regiões, as condicionantes ligadas à água já afetam a viabilidade de operações existentes e impõem cada vez mais custos adicionais. Em certos casos, poderão mesmo ameaçar a viabilidade dos projetos.

Reservatórios hidrelétricos são também utilizados para a gestão de água doce e fornecem uma variedade de usos de valor adicional. Como perspectiva para o desenvolvimento regional em bases sustentáveis, os estudos para a construção de barramentos devem priorizar as alternativas de usos múltiplos dos reservatórios, permitindo a previsão e a avaliação de futuras demandas de água para determinada

região, tanto do ponto de vista socioeconômico como ambiental (FERNANDES & BURSZTYN, 2008).

Além da própria geração de energia elétrica, por meio dos aproveitamentos hidráulicos, outros possíveis usos das águas dos reservatórios de grandes hidrelétricas podem ser: abastecimento de água, irrigação, navegação, recreação e turismo, agricultura de vazante, pesca artesanal, comercial e esportiva, piscicultura intensiva e atividades científicas (FERNANDES & BURSZTYN, 2008).

Embora as hidrelétricas não consumam diretamente a água, a geração de energia pode estar em competição com outros usos, uma vez que nem sempre a liberação das vazões dos reservatórios está sincronizada com as demandas pelo uso da água para outras atividades, podendo afetar negativamente usuários a jusante (BRANCHE, 2015).

Os conflitos entre usuários de água estão aumentando cada vez mais, tornando evidente a falta de um procedimento criterioso, equilibrado e transparente de alocação de água. A questão da distribuição de água entre os setores em geral e, em particular, entre energia hidrelétrica e outras atividades é, portanto, crucial (GALVÃO & BERMANN, 2015). Esta situação é particularmente evidente nas regiões onde a demanda multiuso vem de usuários com uma vasta gama de necessidades e diferentes níveis de poder, e onde apropriação humana de água está chegando a níveis insustentáveis (LOUZADA, 2009).

A energia elétrica oriunda da matriz hidráulica é responsável por aproximadamente 2,4% da geração de energia primária no mundo (3.874 TWh), sendo que o Brasil é responsável por 10% desse valor (IEA, 2015). Apesar de todos os benefícios oriundos da geração de energia elétrica oriunda da matriz hidráulica, a construção de barragens interrompe a continuidade dos ecossistemas fluviais e causa a inundação de áreas adjacentes e de ecossistemas terrestres, podendo afetar negativamente a vida dos moradores locais e causar a destruição de comunidades e terras ancestrais (STICKLER, et al., 2013).

Além disso, um dos impactos negativos causados por reservatórios associados às usinas hidrelétricas (UHEs), e que mais tem gerado debate, é o que diz respeito à alocação adequada dos recursos hídricos. Um questionamento importante, mas ainda sem consenso, é se o uso dos recursos hídricos pelas UHEs é, de fato, não consuntivo (AGUILAR et al., 2011; COOLEY et al., 2011; MEKONNEN & HOEKSTRA, 2011a; TORCELLINI et al., 2003).

Este questionamento emergiu mais acentuadamente com o conceito de “pegada hídrica” (“*water footprint*”), elaborado por Hoekstra & Huang (2002) para estimar a apropriação humana da água doce no globo terrestre. A pegada hídrica (PH) de um produto é o volume de água utilizado para produzi-lo, avaliado ao longo de toda sua cadeia produtiva (HOEKSTRA et al., 2011).

No setor hidrelétrico, a situação é mais específica, e o conceito de pegada hídrica é dado pela relação entre a vazão ou lâmina de água evaporada e a produção de energia, em mm ou m³ por MWh ou GJ (MEKONNEN & HOEKSTRA, 2011a). São encontrados na bibliografia estudos de pegada hídrica de fontes energéticas nos quais se observam dados preocupantes no tocante à perda por evaporação, principalmente em regiões tropicais (BUENO, 2014; GERBENS-LEENES et al., 2008; MEKONNEN & HOEKSTRA, 2011a).

O Brasil é o país com maior potencial hidrelétrico do mundo: um total de 260 mil MW, segundo o último inventário produzido no país, em 1992, pela Eletrobrás (ANEEL, 2008). Deste valor, pouco mais de 35% se transformaram em usinas construídas ou outorgadas. De acordo com o Banco de Informações da Geração (BIG) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), existem atualmente em operação 494 Centrais Geradoras Hidrelétricas (CGHs), com potência total de 321 MW; 476 Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs), com 4.798 MW de potência instalada; e 201 Usinas Hidrelétricas (UHEs), com uma capacidade total instalada de 87.309 MW. Desse modo, as usinas hidrelétricas, independentemente de seu porte, respondem por 66% da potência total instalada no país, de 139.994 MW (ANEEL, 2015).

Segundo a ANA (2009), a Região Hidrográfica do Tocantins-Araguaia é a segunda maior do país em potencial hidroenergético instalado, com 11.573 MW (16% do país) e possui 5 grandes usinas em operação (11.460 MW), todas no rio Tocantins. As usinas de Serra da Mesa (1.275 MW), a montante, e Tucuruí (8.365 MW), na extremidade jusante, delimitam a extensão aproveitável. Entre esses extremos, há a usina de Lajeado (902,5 MW), operando em regime de fio d’água, em virtude da regularização proporcionada por Serra da Mesa.

A usina de Tucuruí tem a maior capacidade instalada totalmente nacional e seu reservatório está entre os dez maiores lagos artificiais do Brasil, com área de 2.875 km² (ANA, 2009). Já a usina de Lajeado foi a última usina hidrelétrica construída na região do Tocantins-Araguaia e sua produção de energia, além de garantir o

suprimento da crescente demanda regional, tornou o estado do Tocantins um dos maiores exportadores de energia para a região sudeste (CELTINS, 2006).

O conhecimento das perdas por evaporação em reservatórios, e consequentemente de sua pegada hídrica, tem grande influência na determinação do volume de água disponível para os múltiplos usos e na garantia de atendimento das demandas de água. Percebe-se, então, a relevância de se entender melhor o processo de evaporação de reservatórios localizados em regiões com diferentes comportamentos climáticos e a necessidade de estimativas mais atualizadas e precisas da evaporação em reservatórios hidrelétricos brasileiros, visando o gerenciamento dos recursos hídricos, de grande valor econômico, social, político e ambiental no cenário nacional.

2. OBJETIVO

Visando contribuir para o melhor entendimento do uso e consumo da água para a produção de energia hidroelétrica, o presente trabalho teve por objetivo estimar a evaporação e a pegada hídrica dos reservatórios das usinas hidrelétricas de Tucuruí-PA e Lajeado-TO.

Especificamente, buscou-se:

- Estimar a evaporação nos reservatórios de Tucuruí-PA e de Lajeado-TO;
- Obter a vazão média evaporada nos reservatórios;
- Estimar a pegada hídrica das usinas hidrelétricas; e
- Analisar a eficiência hídrica das usinas hidrelétricas.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Estimativa da evaporação da água em superfícies livres

A evaporação da água em superfícies livres é um dos principais componentes do ciclo hidrológico. Informações quantitativas desse processo são necessárias na gestão dos recursos hídricos para uma variedade de propósitos, como planejamento de áreas agrícolas irrigadas, previsão de cheias ou a construção e operação de reservatórios (TUCCI, 2002).

A maioria dos métodos existentes estima a evaporação a partir de dados de temperatura, umidade, velocidade do vento e radiação, ou utiliza medidas de tanques de evaporação localizados em estações meteorológicas no ambiente terrestre, as quais são pouco representativas do ambiente sobre o lago (REIS & DIAS, 1998).

Em geral, no Brasil, as pesquisas no campo da evaporação de lagos ainda são escassas, devido principalmente à carência de informações, tanto pelo número reduzido de estações climatológicas em reservatórios, quanto pela pequena extensão temporal das séries e grande número de falhas nos dados (OLIVEIRA et al., 2005).

Os métodos de estimativa da evaporação podem ser classificados de acordo com o processo e, ou, instrumentos usados. Dentre as classificações estão os métodos empíricos, métodos de balanço hídrico, métodos de balanço de energia, métodos de transferência de massa ou baseados na equação de Dalton e métodos combinados (LEÃO et al., 2013).

Os métodos empíricos, usando análise de regressão, relacionam a evaporação em um tanque, ou evaporação no lago, ou medições em lisímetros a elementos meteorológicos (MEKONNEN & HOEKSTRA, 2011a). Alguns exemplos de métodos empíricos são os métodos de Thornthwaite, Jensen-Haise, Papadakis e Blaney-Criddle. Um problema dos métodos empíricos é que eles têm uma limitada aplicabilidade, pois devem ser utilizados sob as mesmas condições para os quais foram calibrados

Os métodos de balanço hídrico podem potencialmente prover estimativas mais confiáveis da evaporação, desde que cada componente do balanço seja medido corretamente, tarefa essa difícil de ser aplicada em condições reais de campo,

principalmente considerando a dinâmica das águas subterrâneas (LENTERS et al., 2005).

No método de balanço de energia, a evaporação de uma superfície líquida é estimada como o saldo de energia no local. Métodos de balanço de energia são considerados por alguns autores como os mais confiáveis na teoria (LENTERS et al., 2005; SINGH & XU, 1997). Entre eles encontram-se os métodos de Linacre, Kohler et al. e Makkink.

Os métodos baseados na transferência de massa utilizam o conceito de transporte de vapor de água para a atmosfera por processo de difusão turbulenta. Esses métodos dão resultados satisfatórios em muitos casos e alguns exemplos são os métodos de Gangopadhyaya et al., Houtman e Linsley et al. (MEKONNEN & HOEKSTRA, 2011a).

Os métodos combinados utilizam tanto o princípio de transferência de energia como o balanço de massa em uma única equação, sendo os mais conhecidos os métodos de Penman, Priestley-Taylor, Morton (CRLE), deBruin, deBruin-Keijman e Brutsaert-Stricker.

Apesar das classificações e diferentes métodos existentes, não existe na literatura um consenso a respeito do qual é o melhor método. A escolha de um método para a estimativa da evaporação da água em superfícies livres requer a análise dos dados edafoclimáticos e das características da região em que se realizará o estudo (RONSEBERRY et al., 2007).

3.1.1 Método de Penman

Um dos métodos mais comumente utilizado para estimar a evaporação da água em superfícies livres a partir de dados meteorológicos tem sido o método de Penman (1948). Esse método combina em apenas uma equação duas diferentes abordagens, transferência de massa e saldo de energia (PEREIRA et al., 2013).

De acordo com a compreensão física do processo, para que a evaporação ocorra é necessária uma força que promova o deslocamento das moléculas de água da superfície evaporante e para a mudança de fase é necessária uma fonte de energia. A fonte de energia seria em função do saldo de radiação e a força para o deslocamento das moléculas seria em função da diferença de pressão de vapor entre a superfície evaporante e o ar que a envolve. Em temperaturas mais baixas (em torno de 10°C), o saldo de radiação contribui com, no mínimo 56% da

evaporação total; e o poder evaporante do ar com, no máximo, 44%. No entanto, com temperaturas mais elevadas (em torno de 30°C), a mesma quantidade de energia radiativa contribuirá com, no mínimo, 82%; e o calor sensível do ar com, no máximo, 18% (PEREIRA et al., 2013). Esta análise permite entender porque alguns métodos empíricos baseados apenas na temperatura ou na radiação solar podem apresentar bom desempenho em algumas situações.

O propósito principal do método de Penman foi eliminar o termo de temperatura da superfície requerido tanto na abordagem de transferência de massa quanto na de balanço de energia (SHIAU & DAVAR, 1973). Dessa forma, o autor considera que a temperatura da superfície da água é igual à temperatura da camada de ar adjacente, ou seja, uma condição de isoterma.

No método de Penman (1948), a parcela correspondente ao fluxo de calor no meio é desprezada, uma vez que segundo o autor seu valor é pequeno quando comparado às demais parcelas (fluxo de calor sensível e fluxo de calor latente) que compõem o balanço de energia na superfície do reservatório. Essa simplificação resulta em um saldo maior de energia disponível para o processo de evaporação, podendo superestimar o seu valor em algumas regiões.

No entanto, segundo Giadrossich et al. (2014), em lagos onde as mudanças sazonais e interanuais na temperatura são pequenas, como em lagos de regiões tropicais, mudanças na energia armazenada no lago podem ser desprezadas.

Apesar das limitações de aplicação, o método de Penman tem sido utilizado em diversos estudos ao redor do mundo, apresentando resultados satisfatórios na estimativa da evaporação de lagos e reservatórios. Este método se tornou um clássico na literatura do tema pelo seu embasamento teórico que incorpora os princípios físicos da transferência de massa e do saldo de radiação (Pereira et al., 2013).

Alguns autores mencionam também o uso da equação de Penman-Monteith para o cálculo da evaporação de reservatórios, porém essa equação foi formulada para o cálculo da evapotranspiração de referência e leva em consideração a “resistência do dossel” à difusão do vapor d’água. Conforme Peres (1994), quando a resistência à troca de calor sensível e latente a partir do interior da folha é igual à zero, o método de Penman-Monteith torna-se semelhante ao de Penman, permitindo estimar evaporação de uma superfície de água livre. Portanto, a equação de Penman-

Monteith para o cálculo da evaporação de reservatórios é a própria equação original de Penman.

Desde a sua criação, o método de Penman (1948) é, possivelmente, a fórmula mais amplamente utilizada para estimar a evaporação a partir superfícies livres de água ou de vegetação. Ele foi o primeiro método combinado a ser criado e é considerado por muitos como o método padrão para a evaporação de superfícies líquidas, sendo que os demais métodos combinados são aproximações ou extensões desse método (DESSIE et al., 2015; PEREIRA et al., 1997; BURMAN & POCHOP, 1994). Seu sucesso quando aplicado a vários locais diferentes é atribuível à sua base conceitual física (FINCH & HALL, 2001; LINACRE, 1993; MEKKONEN & HOEKTRA, 2012; PEREIRA et al., 1997).

A abordagem de Penman tem a vantagem de utilizar uma equação fundamentada em processos físicos, que requer apenas dados climáticos juntamente com alguns coeficientes empíricos. Os parâmetros necessários para sua aplicação são: valores médios diários de insolação, temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento (SHIAU & DAVAR, 1973).

Porém, a dificuldade de obtenção das informações climáticas necessárias para a aplicação do método tem se constituído em limitação à sua utilização e tem motivado muitos autores a estudarem simplificações ou introduzirem correções para diferentes localidades. São exemplos de equações simplificadas: Kohler, Nordenson & Fox (1955), Kohler & Parmele (1967), Linacre (1977, 1993), Priestley & Taylor (1972), Stewart e Rouse (1976) e De Bruin (1978).

Bueno (2014) estimou a evaporação no reservatório da usina hidrelétrica de Camargos, na região do Alto Rio Grande, sul de Minas Gerais, pelos métodos do Tanque Classe A, Linacre, Penman e Penman–Monteith. O autor considerou como Penman-Monteith o método original modificado de Penman em que se considera a variação do armazenamento de calor no corpo d'água. O comparativo das evaporações anuais obtidas pelos métodos de Pennam e Penman-Monteith indicou uma diferença inferior a 1% na evaporação anual e diferenças entre 6 e 30% na escala mensal.

Giadrossich et al. (2014) utilizaram o método do balanço de energia e o método de Penman para estimar a evaporação três lagos africanos (Ziway, Victoria, Bosumtwi), em clima classificado como savana tropical (Aw), verificando que as taxas de evaporação obtidas pelos dois métodos foram muito semelhantes, apesar

de grandes diferenças na área e profundidade dos lagos. Segundo os autores, isso ocorreu devido à falta de variação de armazenamento de calor no reservatório.

Rimmer et al. (2009) estimaram as taxas de evaporação para o lago Kinneret, em Israel, utilizando uma variedade de métodos de medição e de cálculo (tanque de evaporação, balanço de água e energia, métodos aerodinâmicos e método de Penman simplificado), por intermédio de uma multiplicidade de escalas temporais (10 min, 1 h, diária, mensal). Ao comparar os métodos, os autores observaram que as medidas diárias de evaporação do tanque Classe A são muito similares à evaporação do lago calculada pelo método de Penman, quando a mudança no armazenamento de calor não é levada em consideração.

Rosenberry et al. (2007) compararam 15 métodos de evaporação em um pequeno lago, em uma região montanhosa do nordeste dos Estados Unidos, adotando o método de balanço de energia-razão de Bowen (BERB) como o padrão. Os métodos de Priestley-Taylor, de Bruin-Keijman e de Penman foram os que tiveram melhor ajuste, com erros médios entre 0,19 e 0,27 mm/dia.

Elsawwaf et al. (2010) estimaram a evaporação no Lago Nasser, localizado em uma região árida do sul do Egito, utilizando dados meteorológicos e hidrológicos coletados em estações climatológicas flutuantes. Os resultados de seis métodos convencionais de quantificação da evaporação foram comparados com os valores obtidos pelo método de balanço de energia-razão de Bowen (BERB). O método de Penman mostrou ser o mais favorável na escala diária, enquanto que na escala mensal os métodos de Priestley-Taylor e de deBruin-Keijman mostraram melhor ajuste. Diferenças na evaporação média por esses métodos variaram entre 0,14 e 0,36 mm/dia.

Leão et al. (2013) estimaram a evaporação no açude de Banabuiú - CE pelos métodos de Kohler-Nordenson-Fox, Priestley-Taylor, Penman, deBruin-Keijman, Brutsaert-Stricker e deBruin e concluíram que todos são adequados à estimativa de evaporação no reservatório, durante a estação seca, uma vez que todos os métodos obtiveram desempenho ótimo pelo índice estatístico de Camargo & Sentelhas (1997).

3.1.2 Método de Linacre

Linacre (1977), baseado em sucessivas correlações encontradas entre os diversos fatores meteorológicos, propôs uma simplificação da equação de Penman

para estimar taxas de evaporação em diferentes climas, utilizando apenas dados geográficos (latitude e altitude) e temperatura do ar. O autor acreditava que mesmo com as simplificações, a nova equação teria muito da generalidade da fórmula básica de Penman, que se baseia na compreensão física do processo.

A equação original proposta por Linacre (1977) apresenta como principal desvantagem a falta de sensibilidade ao saldo de radiação e aos termos aerodinâmicos e, com isso, tende a subestimar a evaporação de reservatórios. Deste modo, Linacre (1993) propôs uma nova modificação, englobando dados de precipitação e velocidade do vento, e a testou em três lagos dos Estados Unidos, obtendo resultados satisfatórios com o novo método.

Para condições brasileiras, Pereira et al. (2009) estimaram a evaporação do reservatório de Sobradinho – BA, por intermédio dos métodos de Linacre, Kohler e Morton, e concluíram que o método Linacre (1993) superestimou a evaporação. Vieira (2015) confirmou esse resultado, ao estudar a evaporação dos reservatórios de Três Marias-MG e Sobradinho – BA, utilizando seis métodos diferentes e considerando Penman como o padrão.

Leitão et al. (2007) avaliaram o desempenho de diferentes métodos para estimativa da evaporação de lagos em duas regiões na Paraíba (Boqueirão e Patos) e constataram que os métodos que utilizam a umidade relativa do ar, velocidade do vento e radiação solar apresentaram os melhores desempenhos. O método de Linacre (1993) teve desempenho “muito bom” em Boqueirão e “bom” em Patos, com base nos indicadores estatísticos de Camargo & Sentelhas (1997).

3.1.3 Método de Kohler et al.

O método proposto por Kohler et al. (1955) também consiste em uma modificação da equação de Penman, feita a partir de várias observações de evaporação em tanques e lagos. Os autores afirmam que o uso do coeficiente 0,7 para converter evaporação de tanque Classe A em evaporação de lagos pode levar a erros apreciáveis, caso não sejam considerados os efeitos da energia advectiva no lago e da transferência de calor através do tanque.

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. Os autores também consideraram 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 (Pereira et al., 1997).

Pereira et al. (2009) afirmam que o método de Kohler et al. pode ser utilizado como uma boa alternativa na determinação da evaporação média anual no reservatório de Sobradinho-BA, uma vez que esse método apresenta uma base conceitual fundamentada na equação original de Penman e leva em conta o termo aerodinâmico e o saldo de radiação.

Leão et al. (2013), com o objetivo de avaliar diferentes métodos combinados para a estimativa da evaporação no lago de Banabuiú – CE, derivados da equação de Penman, verificaram que o método de Kohler et al. (1955) apresentou ótimo desempenho quando testado para o balanço hídrico durante a estação seca.

3.1.4 Método de Morton (CRLE)

Bouchet (1963) formulou a hipótese de que as variações na evapotranspiração potencial e regional são complementares devido às variações na disponibilidade de água no solo. Esse conceito de relação complementar é baseado na interação entre a superfície evaporante e o ar circulando no ambiente.

Uma reformulação conceitual e revisão sobre o assunto foram realizadas por Morton (1983a, 1983b), dando origem aos métodos “Complementary Relationship Areal Evapotranspiration” (CRAE) e “Complementary Relationship Lake Evaporation” (CRLE) para a estimativa da evapotranspiração real ou regional de uma grande área e a estimativa da evaporação em lagos. Os métodos CRAE e CRLE foram fundamentado na Equação 1 apresenta a seguir.

$$ET + ETP = 2ETW \quad (1)$$

em que:

- ET : evapotranspiração real ou regional de uma área suficientemente grande para que os efeitos de transição das bordas à sotavento sejam desprezíveis (mm/mês);
- ETP : evapotranspiração potencial estimada pela solução 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 transferências de vapor similares às áreas pequenas o suficiente para que os efeitos da evapotranspiração no ar

ETW : sobrepassante sejam desprezados (mm/mês); e
 : evapotranspiração de equilíbrio do ambiente úmido que ocorreria se as superfícies solo-planta estivessem muito úmidas e não houvesse limitações à disponibilidade de água (mm/mês).

A Figura 1 é a representação esquemática da Equação 1, sob condições de suprimento constante de energia radiante. A ordenada representa a evapotranspiração e a abcissa o suprimento de água à superfície solo-planta. Quando não há disponibilidade de água, a evapotranspiração regional (ET) é nula, e com ar quente e seco, a evapotranspiração potencial (ETP) atinge seu valor máximo. Em tais condições, a evapotranspiração potencial corresponde a duas vezes a evapotranspiração de equilíbrio (ETW).

Com o aumento da disponibilidade de água para a superfície solo-planta, ocorre um aumento equivalente da evapotranspiração regional, que provoca um umedecimento e resfriamento do ar sobrepassante que por sua vez leva à uma diminuição na evapotranspiração potencial. Finalmente, quando a disponibilidade de água aumenta significativamente, os valores de evapotranspiração real e potencial convergem para a evapotranspiração de equilíbrio (MORTON,1983a).

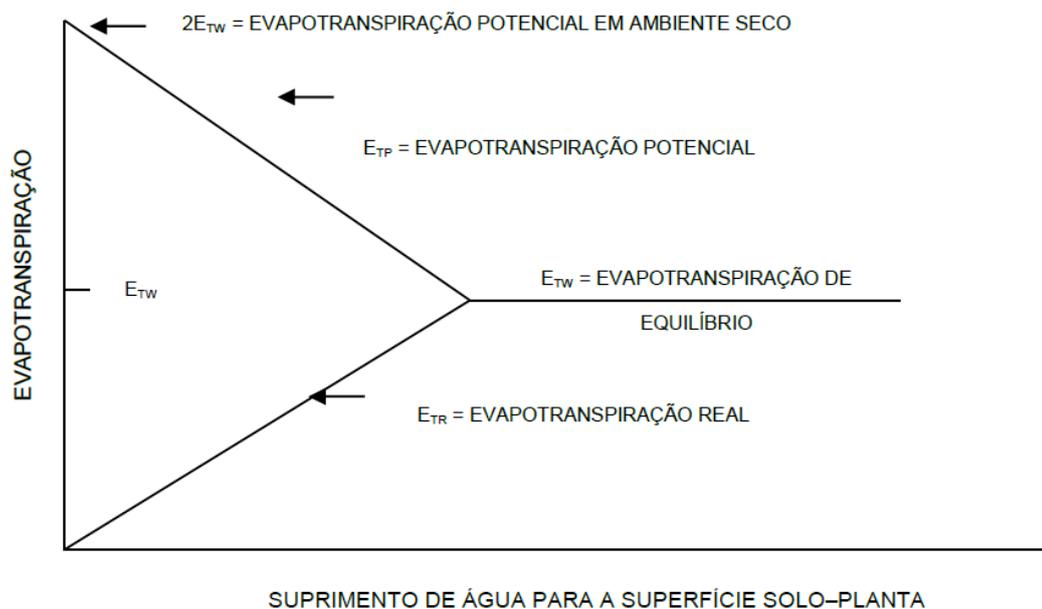


Figura 1: Representação esquemática da relação complementar entre evapotranspiração potencial e espacial com suprimento constante de energia radiante. Fonte: Adaptado de Morton (1983a).

Segundo Morton (1983a), a evaporação de lagos difere da evapotranspiração real de ambientes úmidos, devido às diferenças na absorção de radiação e transferência de vapor entre superfície líquida e vegetada. Pelas mesmas razões, a evaporação potencial também difere da evapotranspiração potencial. Dessa forma, o autor criou o método CRLE, com a hipótese de que variações da evaporação potencial e a evaporação do lago são complementares, devido às variações da disponibilidade de água.

A Figura 2 mostra uma representação esquemática da relação complementar entre evaporação de lago e evaporação potencial no ambiente terrestre, sob condições de suprimento de energia radiante constante. A ordenada representa a evaporação do lago e a abcissa o suprimento de água às superfícies solo-planta adjacentes. Como o lago é definido como uma área suficientemente grande para que os efeitos de transição das bordas à sota-vento sejam desprezíveis, a evaporação no lago é independente da variação no suprimento de água para o sistema solo-planta no ambiente terrestre. No entanto, a relação complementar prevê que a evaporação potencial num ambiente terrestre completamente seco pode ser até duas vezes a evaporação do lago e irá decrescer em resposta ao aumento no suprimento de água às superfícies solo-planta adjacentes, até alcançar um mínimo igual à evaporação do lago (MORTON,1983a).

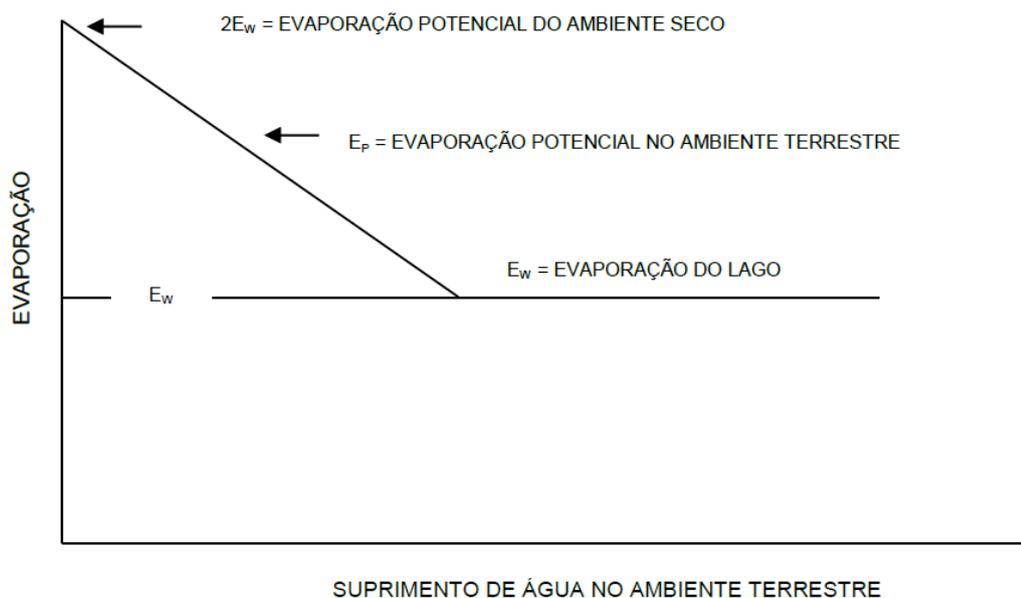


Figura 2: Representação esquemática da relação entre as evaporações do lago (EW) e potencial (EP) no ambiente de terrestre com constante fornecimento de energia radiante. Fonte: Adaptado de Morton (1983a).

Todos os parâmetros citados pelo autor são obtidos por meio de uma calibração envolvendo estimativas de balanço hídrico da evaporação mensal de dez lagos diferentes nos Estados Unidos e Canadá. Morton (1983a) testou o método, comparando as estimativas resultantes da sua aplicação com os balanços hídricos de longo prazo em 28 bacias hidrográficas na América do Norte, África, Austrália e Nova Zelândia, e obteve erros inferiores a 10%.

A equação para estimativa da evaporação do lago proposta por Morton é uma modificação do método de Priestley e Taylor, fundamentada nos conceitos de transferência de massa e balanço de energia com o conceito de temperatura de equilíbrio, substituindo a temperatura real da água. Dessa forma, ela visa incluir os efeitos das variações de temperatura na superfície nos balanços de ondas longas e nas taxas de variação das pressões de saturação do vapor d'água com a temperatura (FONTES, 2005).

A principal vantagem dos métodos de relação complementar é que eles permitem que a evapotranspiração real ou a evaporação no lago, produto de processos e interações complexas no sistema solo-planta-atmosfera, possam ser estimadas através de observações climatológicas de rotina, como as médias mensais de temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento, precipitação e insolação (TROVATI, 1987).

No entanto, por mais que esses métodos estejam fundamentados em uma base física e sejam de fácil aplicação, Morton (1983b) ressalta algumas limitações quanto ao seu uso, sendo elas:

- os dados de temperatura e umidade relativa do ar devem ser precisos e representativos da área de interesse;
- devido à variação no armazenamento subsuperficial de energia, o método não pode ser utilizado para curtos períodos de tempo;
- por causa da advecção de calor e vapor de água da subcamada da atmosfera, não deve ser utilizado em ambientes frios descontínuos, como em latitudes altas e nas extremidades de oásis;
- por não englobar conhecimento do solo e da vegetação, não pode ser utilizado para diagnosticar mudanças naturais ou antrópicas;

- não permite considerar os efeitos da velocidade do vento na evaporação em reservatórios. Isso, porque os efeitos da evaporação pelo aumento da velocidade do vento são compensados pela diminuição da temperatura na superfície da água, e as medições da velocidade do vento em terra são muito sensíveis ao peso do aparelho, o que não fornece uma boa estimativa do parâmetro para o ambiente lacustre.

Roque & Sansigolo (2001) compararam as estimativas mensais de evaporação do lago de Taquaraçu, São Paulo, calculadas pelos métodos de Morton, Penman e Tanque Classe A, e tiveram como resultado que o método de Morton superestimou as taxas de evaporação do lago em relação ao método de Penman no outono e no inverno e subestimou as taxas na primavera e verão. Com base nos resultados, os autores concluíram que o método de Morton fornece estimativas mais realistas e consistentes de evaporação de lagos, principalmente em regiões mais secas.

Fontes (2005) estimou a evaporação em reservatórios localizados no semiárido brasileiro por meio da aplicação dos métodos do Balanço de Energia, Penman, Priestley e Taylor, Relação Complementar de Morton (CRLE) e do Balanço Hídrico, e concluiu que o método de Morton é o mais indicado para a estimativa da evaporação na região, por ter sido o método que menos utilizou valores tabelados de outras regiões e simplificações.

Reis & Dias (1998) calcularam a evaporação em um pequeno reservatório de abastecimento de água (8,8 km²), em Minas Gerais pelo método de balanço de energia-razão de Bowen (BERB) e pelo método de relação complementar de Morton (CRLE), que é amplamente utilizado por empresas de energia elétrica no Brasil. Os autores concluíram que o método de Morton superestimou ligeiramente as taxas de evaporação (8%) no reservatório para o período analisado, em relação método BERB, adotado como padrão.

Roque & Sansigolo (2001) utilizaram o método de relação complementar de Morton (CRLE) para estimar as taxas de evaporação no lago Taquaraçu, SP, no período de 1976 a 1997, e verificar o desempenho do método em relação ao método de Penman. Os autores concluíram que o método de Morton forneceu taxas de evaporação do lago consistentes e próximas às estimadas pelo método de Penman.

Pereira et al. (2009) estimaram a evaporação líquida do reservatório de Sobradinho – BA pelos métodos de Kohler, Linacre, método de relação complementar de Morton (CRLE) e Tanque Classe A, e concluíram que além da

maior complexidade, o método de Morton foi o que apresentou maior discrepância em relação aos demais, em virtude da falta de sensibilidade à velocidade do vento.

Vieira (2015) estimou a evaporação dos Lagos de Sobradinho- BA e Três Marias- MG por diversos métodos, utilizando como padrão o método de Penman. O autor concluiu que para o lago de Sobradinho o método de Morton subestima os valores de evaporação em relação à Penman, e que para o reservatório de Três Marias os resultados não se diferenciaram estatisticamente.

3.1.5 Método de deBruin & Keijman

Combinando o método de Priestley & Taylor com a equação de Penman, deBruin & Keijman (1979) obtiveram um método simples para estimar a evaporação em reservatórios rasos. O método, constituído por uma equação semi-empírica, determina as taxas de evaporação como uma função do teor de umidade do ar acima da massa de água, do calor armazenado no lago, e da constante psicrométrica, que é uma função da pressão atmosférica e do calor latente de vaporização.

Na dedução de sua equação, deBruin & Keijman (1979) utilizaram uma relação empírica para o cálculo da constante de Bowen, obtida por Hicks & Hess (1977). Os autores encontraram que essa relação proporcionava um melhor ajuste aos dados obtidos em campo, porém ela superestima a constante de Bowen em relação à utilizada no método de Penman (1948).

O método foi testado pelos próprios autores no Lago Flevo, um grande lago raso de 460 km² e profundidade média de 3 m, localizado nos Países Baixos, e obteve boa concordância com a evaporação diária medida pelos métodos do balanço de energia e do balanço hídrico, durante o verão e início do outono.

Diversos autores também testaram o método obtendo resultados muito satisfatórios. Leão et al. (2013), por exemplo, com o objetivo de avaliar diferentes métodos combinados derivados da equação de Penman para estimativa da evaporação no lago de Banabuiú, no Estado do Ceará, concluíram que os métodos Priestley-Taylor e deBruin-Keijman são mais adequados para cálculo da evaporação no local, uma vez que apresentaram os melhores coeficientes de confiança e desempenho, de acordo com a metodologia de Camargo & Sentelhas (1997), em relação aos outros métodos testados neste estudo.

Rosenberry et al. (2007) compararam 15 métodos de evaporação em relação ao método de balanço de energia-razão de Bowen (BERB), no lago Mirror, no nordeste dos Estados Unidos, verificando que os métodos de evaporação que incluem os termos energético e aerodinâmico (métodos combinados) fornecem as melhores comparações com evaporação BERB, sendo que o método de deBruin-Keijman forneceu valores que apresentaram erro menor que 20% em mais de 90% dos períodos analisados.

Elsawwaf et al. (2010) compararam os valores de evaporação obtidos por métodos tradicionais (Priestley–Taylor, deBruin–Keijman, Penman, Papadakis, Thornthwaite, Stephens–Stewart, Hargreaves, Makkink, Doorenbos–Pruitt, Jensen-Haise e método de transferência de massa) com os valores obtidos pelo método de balanço de energia-razão de Bowen (BERB), para o lago Nasser, no Egito, e também concluíram que os métodos combinados fornecem os melhores resultados. Os resultados do método de deBruin-Keijman se encontraram dentro de 20% dos valores do BERB durante 96%, 92%, e 97% dos meses nas estações de Jangada, Allaqi e Abusembel, respectivamente.

3.2 Pegada hídrica

Pegadas ambientais são indicadores da pressão humana sobre o meio ambiente e formam a base para o entendimento das mudanças ambientais que derivam dessa pressão, como mudanças no uso e ocupação do solo, degradação do solo, redução da vazão dos rios, poluição das águas e mudanças climáticas (HOEKSTRA & WIEDMANN, 2014).

O conceito de pegada hídrica (PH) foi introduzido por Arjen Hoekstra na reunião de peritos internacionais sobre o comércio de água virtual realizada em Delft, Holanda, no ano de 2002. A PH tem como propósito ilustrar as relações pouco conhecidas entre o consumo humano e o uso da água, assim como entre o comércio global e a gestão de recursos hídricos (DA SILVA et al., 2013).

A pegada hídrica representa a apropriação dos recursos limitados de água doce pelo homem fornecendo, assim, uma base para a discussão sobre a alocação da água e as questões relacionadas ao seu uso sustentável, equitativo e eficiente. Além disso, a pegada hídrica oferece uma base para a avaliação dos impactos dos bens e serviços em nível de bacia hidrográfica e para a elaboração de estratégias para reduzir esses impactos (HOEKSTRA et al., 2011).

Segundo Hoekstra et al. (2011), a PH de um indivíduo, comunidade ou empresa é definida como o volume total de água utilizado para produzir os bens e serviços consumidos pelo indivíduo ou pela comunidade ou produzidos pelas empresas. Ela pode ser dividida em três componentes:

- Pegada hídrica verde (“água verde”): refere-se ao consumo de água da chuva que não é escoada. É particularmente relevante para os produtos agrícolas e florestais, correspondendo à água evapotranspirada pelas plantas e incorporada aos produtos agroflorestais colhidos;
- Pegada hídrica cinza (“água cinza”): refere-se à poluição e é definida como o volume de água doce necessário para assimilar a carga de poluentes, a partir de concentrações naturais e de padrões de qualidade da água existentes; e
- Pegada hídrica azul (“água azul”): é o indicador do consumo de água doce superficial e subterrânea. A perda de água por evaporação, durante o processo produtivo, também é incluída nessa categoria.

Ainda segundo Hoekstra et al. (2011), a pegada hídrica é um indicador abrangente da apropriação dos recursos hídricos, que difere do conceito tradicional e restrito de captação de água em três aspectos:

- Não inclui o uso da água azul, quando essa água é devolvida para onde veio;
- Não está restrito ao uso da água azul, mas inclui também a água verde e cinza; e
- Não é restrito ao uso direto da água, mas inclui também seu uso indireto.

Mekonnen & Hoekstra (2011b) estimaram a pegada hídrica global relacionada às produções agrícola e industrial e ao abastecimento doméstico de água, para o período de 1996 a 2005, e chegaram ao valor de 9.087 Gm³/ano (74% verde, 11% azul e 15% cinza). A produção agrícola é responsável pela maior contribuição, respondendo por 92% desse valor. A produção industrial contribui com 4,4% para a pegada hídrica total e o abastecimento doméstico de água com 3,6%. A pegada hídrica do Brasil corresponde a 4% da pegada hídrica mundial (482 Mm³/ano) e é a quarta maior do mundo, perdendo apenas para Estados Unidos, China e Índia (MEKONNEN & HOEKSTRA, 2011b).

3.2.1 Pegada hídrica de usinas hidrelétricas

A crescente demanda por energia em países com crescimento econômico, como Brasil e China, tem estimulado a expansão das energias renováveis, por exemplo, energia hídrica, eólica e solar. Embora essas fontes renováveis sejam frequentemente consideradas como fontes de energia limpa, tem havido crescente preocupação sobre a sua sustentabilidade ambiental nos últimos anos (MEKKONEN et al., 2015).

O setor hidrelétrico é responsável por aproximadamente 16% do fornecimento mundial de energia. Tem sido muito debatido se o uso da água nesta atividade é simplesmente não consuntivo ou se existe consumo, no sentido de efetiva remoção de água do curso d'água (COOLEY et al., 2011).

Como uma das mais populares formas de energia renovável, a hidroeletricidade é frequentemente considerada como uma fonte de energia limpa e ambientalmente amigável. No entanto, reservatórios criam muitos problemas e, no contexto do presente documento, o problema mais significativo é que o armazenamento de água nas barragens hidroelétricas leva a uma grande quantidade de consumo de água por evaporação da superfície livre (ZHAO & LIU, 2015).

No Congresso Mundial organizado pela Associação Internacional de Hidrelétricas, realizado no Brasil em 2011, uma sessão especial foi dedicada à questão: hidrelétricas consomem água? A seção explorou diferentes interpretações de “consumo” no intuito de reconhecer os impactos da geração de energia na disponibilidade hídrica (AGUILAR et al., 2011). O relatório formulado por Mekonnen & Hoekstra (2011a) é um dos trabalhos que fornece apoio científico para o argumento de que a produção de energia hidrelétrica é, na maioria dos casos, um importante consumidor de água.

A pegada hídrica de hidrelétricas é classificada na categoria de pegada hídrica azul. Trata-se de um indicador calculado pela relação entre o consumo de água de usinas hidrelétricas e a energia produzida, geralmente expresso em m^3/GJ ou m^3/MWh , e depende de vários fatores, como: potência instalada; eficiência das turbinas, área do reservatório, condições climáticas e taxa de evaporação (MEKONNEN & HOEKSTRA, 2011a).

Segundo Mekonnen & Hoekstra (2011a), o volume de água consumida usado no cálculo da pegada hídrica para o setor hidrelétrico pode ser estimado apenas a partir da evaporação dos reservatórios, ou seja, desconsiderando-se o consumo de água

para a operação da usina (por exemplo, para resfriamento de equipamentos, lavagem de máquinas, uso dos funcionários), admitindo-se que estes sejam inexpressivos em relação ao volume evaporado no reservatório.

A pegada hídrica é um campo da ciência muito novo e diversas metodologias ainda estão sendo desenvolvidas e revisadas. Mekonnen & Hoekstra (2011a) sugerem que a pegada hídrica seja calculada considerando a evaporação total no reservatório, sem descontar o que já seria perdido por evapotranspiração real na área correspondente ao espelho d'água do reservatório. Os autores afirmam que a pegada hídrica não se refere à evaporação adicional (comparada à uma situação de referência), mas à quantificação do volume de água consumido que pode ser associado com um propósito humano específico.

Outra abordagem encontrada para o cálculo da pegada hídrica também considera o uso consuntivo da água, porém avalia as consequências da mudança no uso do solo criada pela barragem. A construção de um reservatório resulta na substituição da vegetação por uma superfície de água livre. Assim, a evapotranspiração da vegetação é substituída pela evaporação da superfície líquida do reservatório. Levando isso em conta, neste caso a pegada hídrica considera a perda de água por evaporação líquida na área ocupada pelo reservatório (HERATH et al., 2011).

Adicionalmente, Herath et al. (2011) propuseram uma avaliação hidrológicamente racional para o cálculo da pegada hídrica para geração de energia hidrelétrica, sendo utilizada uma definição de pegada hídrica que vai além do conceito simples de consumo de água. Um balanço hídrico simples foi utilizado para estimar a pegada hídrica, considerando as entradas e saídas de água do reservatório, ou seja, a evaporação e a precipitação.

Gerbens-Leenes et al. (2008) estimaram pegada hídrica para diversas fontes de energia (Tabela 1), considerando apenas o uso consuntivo de água, e concluíram que os valores para as usinas hidrelétricas são bem superiores aos de outras fontes primárias de energia, exceto para geração por biomassa devido ao consumo de água para o desenvolvimento das culturas. A média global da pegada hídrica para hidrelétricas foi estimada em 22 m³/GJ.

Tabela 1: Pegada Hídrica de fontes primárias de energia

Fontes primárias de energia		Pegada hídrica média (m³/GJ)
Não renovável	Gás natural	0,1
	Carvão	0,2
	Energia nuclear	0,1
	Derivados do petróleo	1,1
Renovável	Energia eólica	0
	Energia solar	0,3
	Energia hidrelétrica	22
	Energia de biomassa (Brasil)	61

Fonte: Gerbens-Leenes et al. (2008).

Herath et al. (2011) estimaram a pegada hídrica de geração hidrelétrica para oito usinas hidrelétricas da Nova Zelândia pelos três diferentes métodos citados anteriormente. Como resultado, obtiveram que a média ponderada dos valores da pegada hídrica nos três métodos variou entre 1,55 e 6,05 m³/GJ. Independentemente do método, a PH do potencial hidrelétrico da Nova Zelândia é baixa quando comparada com o valor de 22 m³/GJ estimado por Gerbens-Leenes et al. (2008).

Mekonnen & Hoekstra (2011a) calcularam os valores de pegada hídrica para 35 usinas em diferentes continentes, tendo sido utilizado para o cálculo da evaporação o método de Penman-Monteith e considerando apenas o uso consuntivo de água. Foram consideradas tanto a geração hidroelétrica teórica máxima, referente à energia que pode ser gerada com 100% de disponibilidade de energia hidráulica, quanto a geração real da usina hidrelétrica. Segundo os autores, o clima e o tamanho dos reservatórios influenciaram nos resultados, assim como a potência instalada e a geração de energia real das usinas. As taxas de evaporação variaram de 486 a 3.059 mm por ano e a pegada hídrica real entre 0,3 e 864 m³/GJ, sendo a pegada hídrica média para todas as UHEs estudadas igual a 68 m³/GJ.

Das 35 usinas estudadas por Mekonnen & Hoekstra (2011a), oito estão localizadas em território brasileiro. O resultado da pesquisa para essas usinas é

apresentado na Tabela 2. Nesse caso, a média da pegada hídrica real foi de 86 m³/GJ.

Tabela 2: Pegada hídrica de hidrelétricas do Brasil

Hidrelétrica	Área (km²)	Evaporação anual (mm/ano)	Potência instalada (MW)	Geração real (GJ/ano)	PH teórica (m³/GJ)	PH real (m³/GJ)
Sobradinho	4.214	2.841	1.050	29.973.600	362	399
Itumbiara	760	2.239	2.082	32.400.000	26	53
Estreito	456	2.285	1.050	14.760.000	31,5	70,6
Tucuruí	2.430	2.378	8.400	116.683.200	22	50
São Simão	674	2.229	1635	36.802.800	29	41
Marimbondo	438	2.330	1400	26.640.000	23	38
Jaguari	70	1.782	460	8.640.000	9	14
Itaipu	1.350	1.808	14.000	320.270.400	6	8
Média					68	86

Fonte: Mekonnen & Hoekstra (2011a).

Mekonnen et al. (2015) também avaliaram a pegada hídrica da eletricidade, por região do mundo, nas três principais etapas da cadeia de produção, isto é, no fornecimento de combustível, na construção e na operação. A energia hidrelétrica teve a maior contribuição para a pegada hídrica total do setor elétrico, com pegadas hídricas, variando de 0,3 a 850 m³/GJ. Os autores também observaram que quando os países têm uma contribuição relativamente grande da energia hidroelétrica ou de lenha na matriz energética, a PH é relativamente grande. Pegadas hídricas maiores que a média global são encontrados em países como Brasil, Argentina, Índia, Canadá, Japão e muitos países africanos.

Como pode ser observado, os resultados obtidos nos estudos citados anteriormente variaram expressivamente, sendo que o valor estimado por Mekonnen & Hoekstra (2011a), pelo método do uso consuntivo, é três vezes maior do que o valor estimado por Gerbens-Leenes et al. (2008) para a média global da PH de usinas hidrelétricas, pelo mesmo método. Esses resultados provavelmente decorreram da utilização de diferentes metodologias para a estimativa da evaporação das superfícies líquidas, já que os dados de geração de energia são

obtidos em função da potência instalada de cada usina hidrelétrica. Isso mostra a necessidade de estudos para se obter estimativas mais precisas da evaporação de reservatórios e da pegada hídrica de hidrelétricas, especialmente no Brasil, onde a hidroeletricidade é a base da matriz energética.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Caracterização da área de estudo

A barragem de Tucuruí situa-se na região hidrográfica do Tocantins-Araguaia, no baixo rio Tocantins, no Estado do Pará (Figura 3). O barramento completo do rio ocorreu entre 1984 e 1985 e o reservatório formado inundou uma área de 2.875 km², da qual 25% correspondem a áreas anteriormente ocupadas pelo rio Tocantins e seus principais afluentes (SANCHES & FISCH, 2005). O reservatório apresenta um perímetro de 7.700 km, volume total de 50,30 bilhões de metros cúbicos e profundidade média de 17,5 metros (FERREIRA, 2012; SANCHES & FISCH, 2005).

A UHE de Tucuruí é uma usina de acumulação. Esse tipo de barramento permite o acúmulo de grande quantidade de água que funciona como estoque a ser utilizado em períodos de estiagem. Além disso, como está localizada a montante das demais hidrelétricas, regula a vazão da água que irá fluir para elas, de forma a permitir a operação integrada do conjunto de usinas (ANEEL, 2008).

Construída em duas etapas, a usina hidrelétrica de Tucuruí tem capacidade instalada de 8.370 MW. As obras da primeira casa de força, com potência instalada de 4.245 MW, foram concluídas em dezembro de 1992. Em junho de 1998 foi iniciada a construção da segunda casa de força, com potência instalada total de 4.125 MW, concluída em abril de 2007 (ELETROBRAS, 2015).

A região onde está localizado o reservatório da UHE de Tucuruí apresenta, segundo Köppen-Geiger, clima tropical úmido (Am), com duas estações bem definidas e características: período chuvoso (dezembro a maio), com chuvas intensas de origem convectiva e totais mensais atingindo valores entre 500 a 600 mm por mês; e período seco (junho a novembro), com uma estiagem pronunciada (agosto a setembro), quando a precipitação é tipicamente da ordem de 30 mm por mês (FISH et al., 1990; PEEL et al., 2007).

A precipitação média anual é da ordem de 2.200 mm (BRASIL, 1992) e a temperatura média do ar na região é caracterizada por altos valores e uma quase isoterma ao longo do ano, com média em torno dos 26°C (FISH et al., 1990). A velocidade dos ventos apresenta valores típicos da ordem de 1,0 a 2,0 m/s e do ponto de vista da macro e meso-escala, os ventos na região amazônica são fracos e provém de todas as direções, com predominância de ventos do leste (FISH et al., 1990).

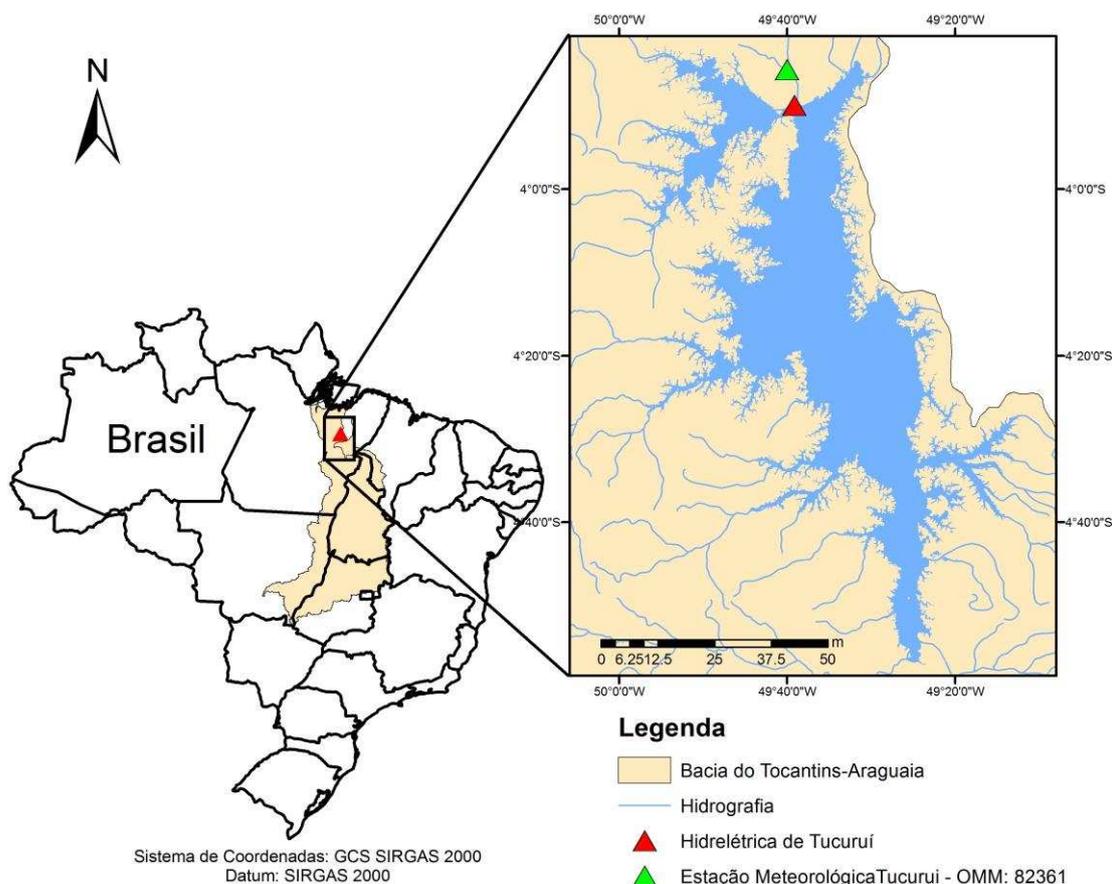


Figura 3: Localização do reservatório da hidrelétrica de Tucuruí.

A barragem de Lajeado situa-se também região hidrográfica do Tocantins-Araguaia, porém no médio Tocantins, distante 1.030 km de sua foz (Figura 4). O enchimento do reservatório iniciou-se em setembro de 2001, com encerramento em fevereiro de 2002, inundando uma área de 630 km². O reservatório possui um volume total de 5,20 bilhões de metros cúbicos, profundidade média de 8 metros e perímetro de 1.164 km (INVESTCO, 2015).

A UHE de Lajeado é uma usina “a fio d’água”, ou seja, o seu reservatório não apresenta a finalidade de regularização de vazões e a geração de energia é realizada com o fluxo de água natural do rio, ou seja, necessitando de uma menor acumulação de água pelo barramento. Este tipo de usina tem como característica um menor reservatório, que opera praticamente em níveis constantes, admitindo pequenas flutuações devido a requisitos de variação da produção de energia, não havendo armazenamento de água para escoamento sazonal, como ocorre nas unidades que operam com reservatórios de acumulação (ANEEL, 2008).

Com potência instalada total de 902 MW, a Usina de Lajeado permite gerar aproximadamente 4.600.000 megawatts-hora por ano, em função da disponibilidade média de água no rio Tocantins. A primeira unidade geradora entrou em operação em dezembro de 2001 e a quinta unidade geradora foi inaugurada em novembro de 2002 (INVESTCO, 2015).

A região onde está localizado o reservatório da UHE de Lajeado apresenta, segundo a classificação climática de Köppen-Geiger, clima tropical com estação seca (Aw) e temperatura média anual de 26°C (PEEL et. al, 2007). A média das máximas é 36°C e ocorre em setembro, enquanto a mínima é de 22°C e ocorre em julho. Do ponto de vista da macro e meso-escala os ventos na região são considerados moderados a fracos, com predominância no sentido sudeste e valores típicos de velocidade da ordem de 1,1 a 1,6 m/s. (FREITAS et al., 2010).

A distribuição sazonal das precipitações está bem caracterizada com dois períodos bem definidos: a estação chuvosa, de outubro a abril, e a estação seca, de maio a setembro (DE SOUZA et al., 2014). No mês com maior precipitação, janeiro, chove em média 240 mm; enquanto o mês mais seco, julho, precipita em média 5 mm (DE SOUZA et al., 2014). A precipitação média anual é da ordem de 1.700 mm (BRASIL, 1992).

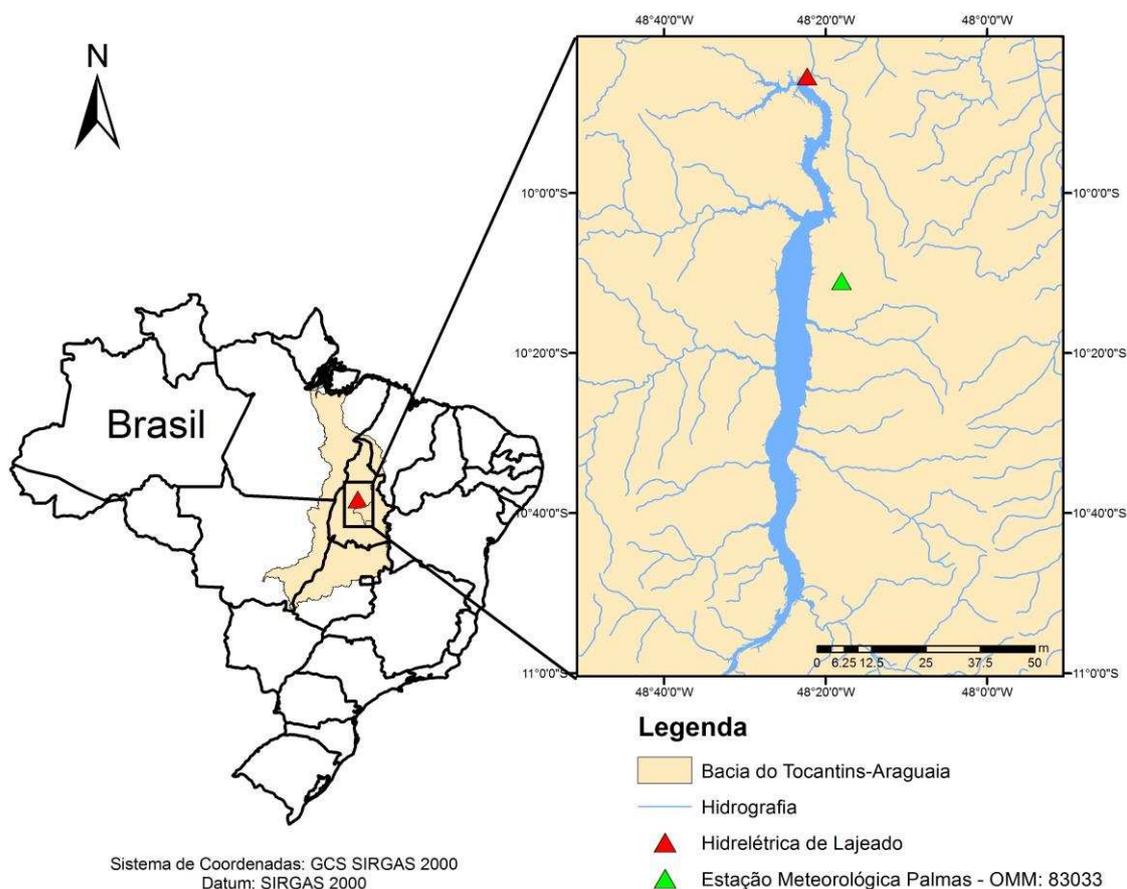


Figura 4: Localização do reservatório da hidrelétrica de Lajeado.

A Tabela 3 apresenta um resumo das principais características dos reservatórios das usinas hidrelétricas de Tucuruí e Lajeado.

Tabela 3: Características das UHEs de Tucuruí e Lajeado.

Características	Tucuruí	Lajeado
Área do reservatório (km²)	2.875	630
Volume acumulado (bilhões de m³)	50,3	5,2
Altura da barragem (m)	85	74
Comprimento do eixo da barragem (m)	9.689	2.034
Profundidade média (m)	17,5	8,0
Perímetro (km)	7.700	1.164
Capacidade de geração (MW)	8.370	902
Início de operação	1992	2002

Adaptado de: Sanches & Fisch (2005); Ferreira (2012); Eletrobras (2015) e Investco (2015).

4.2 Base de dados climáticos

Foram utilizados dados de precipitação, temperatura, umidade relativa, velocidade do vento e insolação, obtidos das estações meteorológicas de Tucuruí (OMM: 82361), localizada nas coordenadas 3°45'37''S e 49°40'00''W, e de Palmas (OMM: 83033), localizada nas coordenadas 10°11'27''S e 48°18'06''W, fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) (Figura 3 e Figura 4).

Não foi possível utilizar dados de outras localidades próximas aos reservatórios, devido à inexistência de estações meteorológicas, no caso de Tucuruí, e devido à pequena série histórica e ao grande número de falhas das estações encontradas no entorno de Lajeado.

O período base de dados para o cálculo da evaporação foi selecionado a partir da data de início de operação das hidrelétricas, eliminando-se os anos com falhas superiores a quatro meses, resultando na série histórica de dados mensais de 1986 a 1990 e 2001 a 2014, para a estação Tucuruí, e de 2002 a 2014 para a estação Palmas.

Na Figura 5 encontram-se as variações dos principais parâmetros climáticos utilizados nos métodos de estimativa da evaporação, relativos às estações climatológicas de Tucuruí e Palmas, para os períodos citados.

Em relação ao regime de precipitação (Figura 5a), observa-se que em Tucuruí as maiores lâminas precipitadas ocorrem no verão, principalmente nos meses de janeiro a abril, com valores acima de 350 mm por mês, e a partir de maio as reduções no total mensal precipitado são expressivas. O período de estiagem ocorre nos meses de julho a outubro, com índices menores que 70 mm por mês. Para Palmas, o comportamento sazonal da precipitação segue o mesmo padrão de Tucuruí, porém o inverno é mais seco, com precipitação praticamente nula nos meses de junho a agosto e as maiores lâminas precipitadas ocorrendo nos meses de janeiro a março, com valores acima de 290 mm por mês.

Nas estações estudadas a temperatura média (Figura 5b) tem pequena oscilação ao longo do ano, variando entre 27,9°C (fevereiro) e 29,6°C (novembro) em Tucuruí e entre 26,9°C (fevereiro) e 30,6°C (setembro), em Palmas.

A insolação média diária (Figura 5c) possui maiores valores nos meses de junho a agosto em Tucuruí, sendo julho o mês de maior insolação, apresentando uma média de 8,4 horas de radiação que atinge a superfície por dia. Os menores valores de insolação são registrados nos meses de dezembro a março, com médias de 4,5

horas de radiação diária. Em Palmas, a insolação segue o mesmo padrão, porém o valor máximo de insolação atinge 9,6 horas em junho e o mínimo de 4,5 horas em fevereiro.

Na Figura 5d encontra-se ilustrado o regime anual da velocidade do vento, que para a região de Tucuruí não varia muito ao longo do ano, sendo o máximo de 1,6 m/s e o mínimo de 1,2 m/s nos meses de abril e setembro, respectivamente. Já em Palmas há uma variação da velocidade do vento mais expressiva, sendo esta maior nos meses de inverno (junho a outubro) e menor no verão (novembro a maio). O valor máximo da velocidade do vento ocorre no mês de agosto e é igual a 2,07 m/s, enquanto o valor mínimo ocorre em março, sendo de 0,86 m/s.

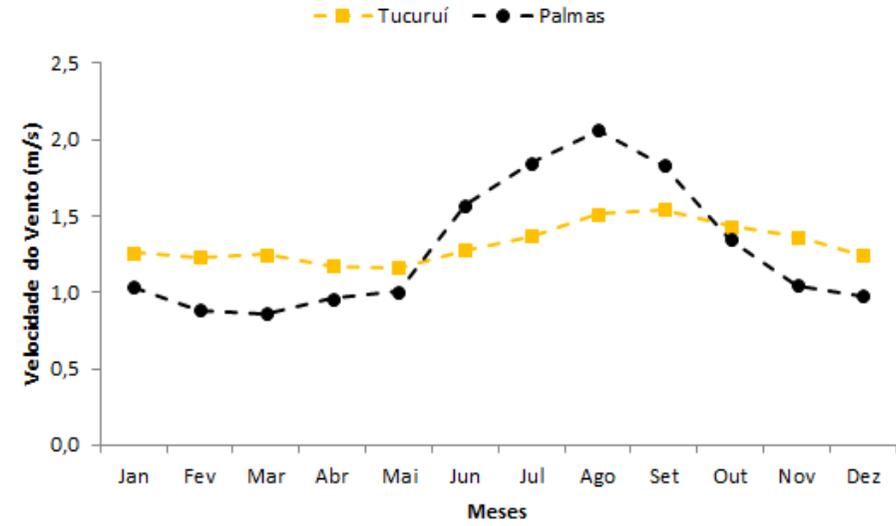
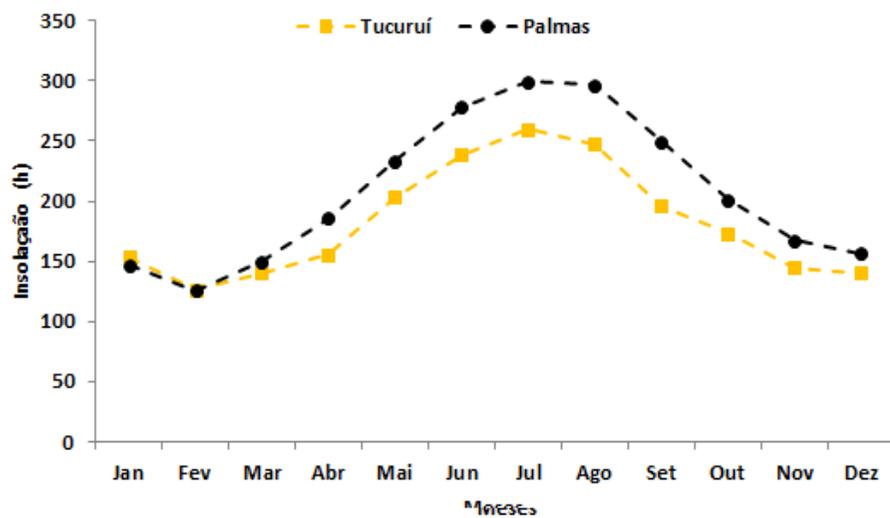
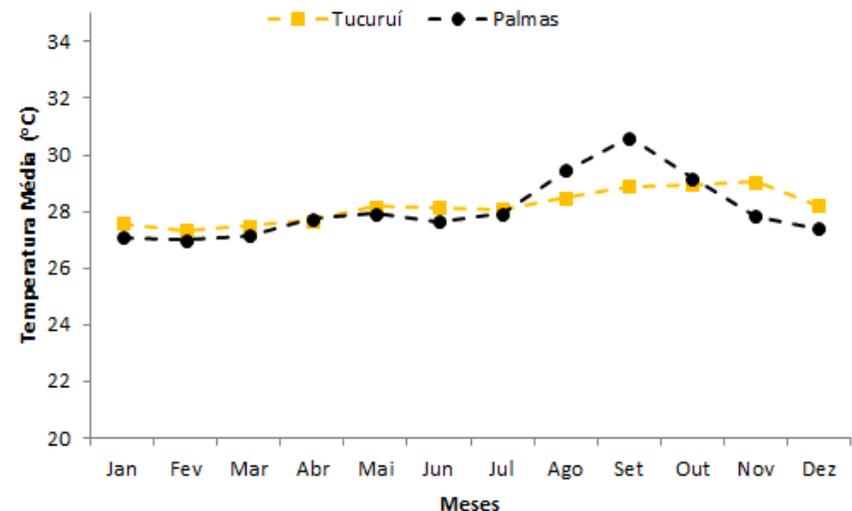
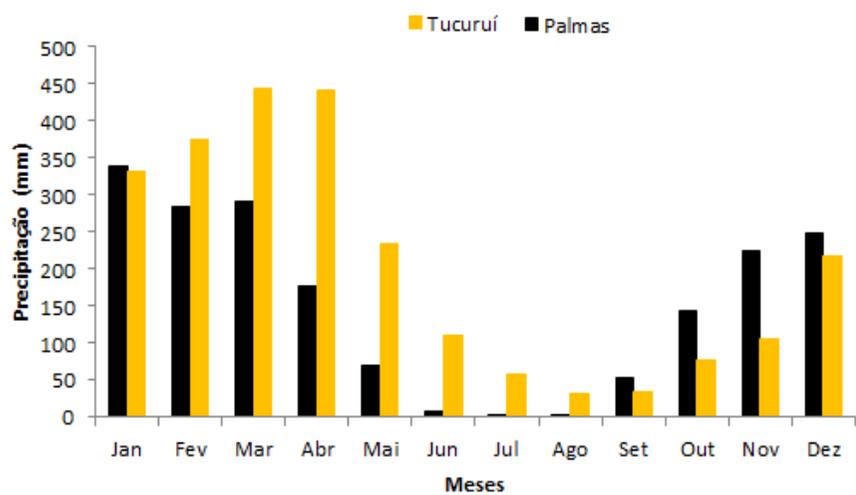


Figura 5: Comportamento climatológico das estações Tucuruí e Palmas: (a)precipitação; (b)temperatura média; (c)insolação; e (d) velocidade do vento.

4.3 Estimativa da evaporação da água nos reservatórios

As estimativas da evaporação nos reservatórios de Tucuruí e Lajeado foram realizadas utilizando-se os métodos Penman (1948,1956), Linacre (1993), Kohler et al. (1955), relação complementar para lagos (CRLE), proposta por Morton (1983) e deBruin & Keijman (1979).

4.3.1 Método de Penman

A estimativa da evaporação dos reservatórios de Tucuruí e Lajeado pelo método de Penman (1948, 1956) baseou-se na seguinte equação:

$$E_R = 86,4 \times \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \times \frac{R_n}{\lambda \rho} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \times 0,26(0,5 + 0,54u_2)(e_s - e_a) \quad (2)$$

em que:

- E_R : evaporação do reservatório (mm/dia);
- Δ : declividade da curva de pressão de saturação do vapor d'água (kPa/°C);
- R_n : saldo diário de irradiação medido sobre a superfície de água livre (W/m²);
- G : variação no armazenamento de calor no reservatório (W/m²);
- γ : constante psicométrica (kPa/°C);
- u_2 : velocidade do vento a dois metros de altura (m/s);
- e_s : pressão de saturação de vapor d'água à temperatura do ar (mbar);
- e_a : pressão parcial de vapor d'água à temperatura do ar (mbar);
- λ : calor latente de evaporação (MJ/kg); e
- ρ : peso específico da água (kg/m³).

No presente trabalho a variação no armazenamento de calor no reservatório (G) foi considerada nula, devido à inexistência de dados de temperatura do lago e ao fato de que as mudanças na energia armazenada em reservatórios podem ser desprezadas em reservatórios onde as mudanças sazonais e interanuais na temperatura são pequenas (GIADROSSICH et al., 2014), como no caso dos reservatórios de Tucuruí e Lajeado.

A obtenção dos parâmetros da Equação 2 seguiu a metodologia descrita por Allen et al. (1998), conforme a sequência de cálculos apresentada a seguir:

$$\lambda = 2,501 - 0,002361T \quad (3)$$

em que T corresponde a temperatura média do ar, em °C.

$$\gamma = (6,65 \times 10^{-4})P \quad (4)$$

em que P corresponde à pressão atmosférica, em mbar.

$$e^0(T) = 0,6108 \exp\left[\frac{17,27T}{T + 237,3}\right] \quad (5)$$

$$e_s = \frac{e^0(T_{\max}) + e^0(T_{\min})}{2} \quad (6)$$

em que:

- $e^0(T)$: pressão de saturação de vapor d'água no ar à temperatura T (kPa);
- T_{\max} : temperatura máxima do ar (°C); e
- T_{\min} : temperatura mínima do ar (°C).

$$\Delta = \frac{4098 e_s}{(T + 237,3)^2} \quad (7)$$

em que: e_s corresponde à pressão de saturação de vapor d'água no ar à temperatura do ar, em kPa.

$$e_a = e_s \frac{UR}{100} \quad (8)$$

em que UR corresponde à umidade relativa do ar, em %.

$$R_a = 37,586 dr [w_s \text{sen}(\varphi) \text{sen}(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \text{sen}(w_s)] \quad (9)$$

$$dr = 1 + 0,33 \cos\left(\frac{2\pi J}{365}\right) \quad (10)$$

$$\delta = 0,409 \operatorname{sen}\left(\frac{2\pi}{365} J - 1,39\right) \quad (11)$$

$$w_s = \arccos[-\tan(\varphi) \tan(\delta)] \quad (12)$$

em que:

- R_a : radiação solar no topo da atmosfera (MJ/(m² dia));
- dr : distância relativa Terra-sol (adimensional);
- J : dia juliano (adimensional);
- δ : declinação solar (adimensional);
- φ : latitude (radianos); e
- w_s : ângulo horário do pôr do sol (radianos).

$$R_s = \left(0,25 + 0,5 \frac{n}{N}\right) R_a \quad (13)$$

em que:

- R_s : radiação solar incidente (MJ/(m² dia));
- n : número de horas de insolação (horas); e
- N : fotoperíodo (horas)

$$R_{so} = 0,75 R_a \quad (14)$$

em que R_{so} corresponde à radiação solar sem nebulosidade, em MJ/(m² dia).

$$R_{ns} = (1 - \alpha) R_s \quad (15)$$

em que:

- R_{ns} : saldo de radiação de onda curta (MJ/(m² dia)); e
- α : albedo da água do reservatório (adimensional).

O albedo da água pode variar de acordo com a sua turbidez, ou seja, a presença de sólidos dissolvidos. Diversos autores determinaram o albedo da água de reservatórios brasileiros, obtendo valores que variaram entre 0,05 e 0,18, chegando a um valor médio de 0,11 (GIONGO & VETTORAZI, 2014; LEIVAS et al., 2007; LOPES et al., 2009). Esse valor foi, portanto, adotado no presente trabalho.

$$R_{nl} = \sigma \left[\frac{T_{\max K}^4 + T_{\min K}^4}{2} \right] (0,34 - 0,14 \sqrt{e_a}) \left(1,35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35 \right) \quad (16)$$

em que:

- R_{nl} : saldo de radiação de onda longa (MJ/(m² dia));
- $T_{\max K}$: temperatura máxima do ar (K);
- $T_{\min K}$: temperatura mínima do ar (K); e
- σ : constant de Stefan-Boltzmann (4,903x10⁻⁹ MJ K⁻⁴ m⁻² dia⁻¹).

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (17)$$

em que R_n corresponde ao saldo de radiação, em MJ/(m² dia)

4.3.2 Método de Linacre

A estimativa da evaporação de água nos reservatórios (mm/dia) pelo método de Linacre (1993) foi calculada através da seguinte equação:

$$E_R = (0,015 + 0,00042T + 10^{-6}h) \times [0,8R_s - 40 + 2,5Fu_2(T - T_d)] \quad (18)$$

em que:

- E_R : evaporação do reservatório (mm/mês);
- T : temperatura média mensal do ar (°C);
- R_s : radiação solar incidente na superfície do reservatório (W/m²);
- F : fator de correção devido à altitude do local (adimensional);
- u_2 : velocidade do vento a 2 m de altura (m/s);
- h : altitude do local (m); e
- T_d : temperatura média mensal do ponto de orvalho (°C).

A radiação solar incidente na superfície do reservatório (R_s) foi calculada utilizando-se informações adicionais sobre nebulosidade e precipitação. O cálculo dessa variável é baseado na radiação solar no topo da atmosfera (R_a) e foi obtida pela seguinte relação:

$$R_s = R_a(0,85 - 0,047C) \quad (19)$$

em que:

- R_a : radiação solar no topo da atmosfera (W/m²); e
- C : média do número de décimos do céu ocupado por nuvens no

momento da observação (adimensional).

O valor de C pode ser inferido a partir de uma relação empírica envolvendo a precipitação média mensal, dada pela seguinte equação:

$$C = 1 + 0,5 \log(P_m) + [\log(P_m)]^2 \quad (20)$$

em que P_m corresponde à precipitação média mensal, em mm.

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

$$F = 1 - 0,000087 h \quad (21)$$

em que:

- F : fator de correção devido à altitude do local (adimensional); e
- h : altitude do local (m);

4.3.3 Método de Kohler et al.

A evaporação nos reservatórios segundo este método foi feita utilizando-se dados meteorológicos diários, através equação:

$$E_R = 0,7 \left(\frac{\Delta R_n + \gamma_l E_a}{\Delta + \gamma_l} \right) \quad (22)$$

em que:

- E_R : evaporação do reservatório (mm/dia);
- γ_l : constante psicrométrica corrigida, (kPa/°C);
- Δ : declividade da curva de pressão de saturação do vapor d'água, (kPa/°C);
- E_a : poder evaporante do ar, (mm/dia); e
- R_n : saldo diário de radiação medido sobre a superfície de água livre, em equivalente de lâmina de água evaporada, (mm/dia).

O coeficiente psicrométrico foi calculado a partir da seguinte equação:

$$\gamma = 0,000661 P \quad (23)$$

em que P corresponde à pressão atmosférica, em kPa.

A função aerodinâmica foi avaliada por Kohler et al. (1955), utilizando dados de evaporação de tanque obtidos de quatro localidades dos Estados Unidos, chegando-se à seguinte relação:

$$E_a = 25,4[0,296(e_s - e_a)^{0,88}](0,37 + 0,00255 u_p) \quad (24)$$

em que:

- e_s : pressão de saturação de vapor d'água no ar à temperatura do ar (kPa);
- e_a : pressão parcial de vapor d'água no ar à temperatura do ar (kPa);
- u_p : velocidade do vento a 15,2 cm de altura acima do Tanque Classe A (km/dia).

O saldo de radiação foi calculado utilizando-se as mesmas equações do método de Penman e a conversão da radiação solar (MJ/m²dia) em lâmina d'água evaporada (mm/dia) foi dada da seguinte maneira:

$$R_n(\text{mm/dia}) = \frac{R_n(\text{MJ/m}^2 \text{dia})}{\lambda \rho} \quad (25)$$

em que:

- λ = calor latente de evaporação (MJ/kg); e
- ρ = peso específico da água (kg/m³).

4.3.4 Método de Morton (CRLE)

O cálculo da evaporação nos reservatórios pelo método CRLE ("Complementary Relationship Lake Evaporation") proposto por Morton (1983a) foi realizado utilizando-se a seguinte equação:

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

em que:

- E_R : evaporação do reservatório (mm/mês);
- P : pressão atmosférica na localidade considerada (mbar);
- P_s : pressão atmosférica ao nível do mar (mbar);
- Δ_p : declividade da curva de pressão de vapor de saturação na

R_{TP} : temperatura de equilíbrio (mbar/°C); e
 : saldo de irradiância na temperatura de equilíbrio (W/m²).

A razão entre pressão atmosférica no local do reservatório e a pressão atmosférica ao nível do mar foi calculada pela seguinte equação:

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

em que h corresponde à altitude do local, em m.

Calcularam-se, pelas equações 28 e 29, a declividade da curva de pressão de vapor na temperatura de equilíbrio e a pressão de saturação de vapor.

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

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

em que:

ν : pressão de saturação de vapor à temperatura média do ar (mbar); e
 T : temperatura média do ar (°C).

Os vários ângulos e funções necessários para a estimativa da radiação global (W/m²) foram computados de acordo com as seguintes equações:

$$\theta = 23,2 \text{sen}(29,5i - 94) \quad (30)$$

$$\cos Z = \cos(\phi - \theta) \quad (31)$$

$$\cos \omega = \frac{1 - \cos Z}{\cos \phi \cos \theta} \quad (32)$$

$$\eta = 1 + \left(\frac{1}{60} \right) \text{sen}(29,5i - 106) \quad (33)$$

em que:

- θ : a declinação do sol (radianos);
- ϕ : latitude (radianos);
- ω : deslocamento angular da terra do nascer-do-sol ao meio-dia (radianos);
- z : ângulo zenital médio diário (radianos);
- Z : ângulo zenital ao meio-dia (radianos);
- i : número do mês do ano; e
- η : raio vetor do sol (adimensional).

A radiação solar no topo da atmosfera foi, então, calculada pela expressão a seguir:

$$G_E = \left(\frac{1354}{\eta^2} \right) \left(\frac{\omega}{180} \right) \cos z \quad (34)$$

em que G_E corresponde à radiação solar no topo da atmosfera, em W/m^2 .

O albedo para a condição de céu claro foi estimado por meio da equação:

$$a_0 = \frac{0,11 \left[\exp 1,08 \left(\frac{2,16 \cos z}{\pi + \text{senz}} \right) \exp(0,012 z) \right]}{1,473(1 - \text{senz})} \quad (35)$$

O vapor de água precipitável e o coeficiente de turbidez foram obtidos da seguinte forma:

$$W = \frac{\nu_D}{0,49 + \frac{T}{129}} \quad (36)$$

$$j = \left[0,5 + 2,5 \cos^2 z \right] \exp \left[21 - T \left(\frac{P}{P_s} - 1 \right) \right] \quad (37)$$

em que ν_D é a pressão de saturação de vapor na temperatura do ponto de orvalho, em mbar.

A transmitância para condição de céu claro foi calculada de acordo com a equação mostrada a seguir.

$$\tau = \exp \left[-0,089 \left(\frac{P}{P_s} \right)^{0,75} - 0,083 \left(\frac{j}{\cos Z} \right)^{0,90} - 0,0288 \left(\frac{W}{\cos Z} \right)^{0,60} \right] \quad (38)$$

em que:

- j : coeficiente de turbidez (adimensional);
- W : vapor de água precipitável (mm); e
- τ : transmitância do céu claro para a radiação solar direta (adimensional).

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

$$\tau_a = \exp \left[-0,0415 \left(\frac{j}{\cos Z} \right)^{0,90} - 0,0029^{0,5} \left(\frac{W}{\cos Z} \right)^{0,3} \right] \quad (39)$$

em que τ_a corresponde à fração da transmitância absorvida na condição de céu claro, em W/m^2 .

Obeve-se a radiação global na condição de céu claro pela equação:

$$G_0 = G_E \tau \left[1 + \left(1 - \frac{\tau}{\tau_a} \right) (1 + \alpha_0 \tau) \right] \quad (40)$$

em que:

- G_0 : radiação solar na condição de céu claro (W/m^2); e
- α_0 : albedo para dia de céu claro (adimensional).

A radiação global incidente foi calculada a partir da equação:

$$G = S G_0 (0,08 + 0,30 S) (1 - S) G_E \quad (41)$$

em que:

- G : radiação global incidente (W/m^2); e
- S : razão entre a duração de brilho solar observado e a máxima duração de brilho solar possível (adimensional).

A estimativa do albedo médio foi realizada pela equação:

$$\alpha = \alpha_0 \left[S + (1 - S) \left(1 - \frac{Z}{330} \right) \right] B \quad (42)$$

em que:

α : albedo médio, adimensional.

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

$$\rho_r = 0,18 \left[\left(1 - 10 \left(\frac{\nu_D}{\nu} - S - 0,42 \right) \right) (1 - S)^2 + 10 \left(\frac{\nu_D}{\nu} - S - 0,42 \right) (1 - S)^{0,5} \right] \frac{P_s}{P} \quad (43)$$

em que:

ρ_r : incremento na radiação atmosférica devido às nuvens (adimensional); e

ν_D : pressão de saturação de vapor na temperatura do ponto de orvalho calculada pela equação 29, com $T = T_d$ (mbar).

A temperatura do ponto de orvalho (T_D) foi calculada no programa computacional REF-ET[®], desenvolvido por Allen (2000).

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

$$B = 5,22 \times 10^{-8} (T + 273)^4 \left[1 - \left(0,71 + 0,007 \nu_D \frac{P}{P_s} \right) (1 + \rho) \right] \quad (44)$$

em que B corresponde à perda de radiação de ondas longas pela superfície solo-planta na temperatura do ar, em W/m².

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

$$R_w = (1 - \alpha)G - B \quad (45)$$

em que R_w corresponde ao saldo de radiação à temperatura do ar, em W/m²:

Considerando que as condições do fluxo de radiação e da transferência de vapor na equação de Penman (1948) sugerem um índice representativo do efeito da

estabilidade atmosférica e da transferência de vapor, o fator de estabilidade foi calculado pela equação:

$$\xi = \left[\frac{0,28 \left(1 + \frac{v_D}{v} \right) + \Lambda R_w}{\gamma P \left(\frac{P_s}{P} \right)^{0,5} f_z (v - v_D)} \right]^{-1} \quad (46)$$

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

$$f_w = \frac{\left(\frac{P_s}{P} \right)^{0,5} f_z}{\xi} \quad (47)$$

em que:

- f_w : coeficiente de transferência de vapor, adimensional; e
- f_z : constante para cálculo da evaporação em reservatórios igual a 25,0 W/(m² mbar).

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

$$\lambda = 0,66 \frac{P}{P_s} + \frac{20,88 \times 10^{-8} (T + 273)^3}{f_w} \quad (48)$$

Por meio de processo iterativo computacional realizado no programa Microsoft Excel, a temperatura de equilíbrio foi calculada com base nas seguintes equações:

$$\delta T_p = \frac{\frac{R_w}{f_w} + v - v'_p + (T - T'_p)}{\Delta'_p + \lambda} \quad (49)$$

$$T_p = T'_p + \delta T_p \quad (50)$$

em que:

- v'_p : pressão de saturação de vapor na temperatura de equilíbrio (mbar);
- T'_p : conjunto de valores de T_p no processo iterativo; e
- δT_p : correção de T'_p no processo iterativo.

O processo iterativo foi repetido até que o valor de δT_p fosse inferior ou igual a 0,01 °C. Obteve-se, pela equação a seguir, a evaporação potencial:

$$E_p = R_w - \lambda_c f_w (T_p - T) \quad (51)$$

em que:

- E_p : evaporação potencial, (mm/mês);
- λ_c : coeficiente de transferência de calor (adimensional); e
- T_p : temperatura de equilíbrio da subcamada de ar próximo à superfície (°C).

Obteve-se o saldo de radiação na temperatura de equilíbrio pela seguinte equação:

$$R_{TP} = E_p 0,66 \frac{P}{P_s} f_w (T_p - T) \quad (52)$$

4.3.5 Método de deBruin & Keijman

A estimativa da evaporação de água nos reservatórios (mm/dia) pelo método de deBruin & Keijman (1979) foi obtida através da equação:

$$E_R = \left(\frac{\Delta}{0,85\Delta + 0,63\gamma} \right) \frac{(R_n - G)}{\lambda\rho} \times 86,4 \quad (53)$$

em que:

- E_R : evaporação do reservatório (mm/dia);
- Δ : declividade da curva de pressão de vapor de saturação (kPa/°C);
- γ : coeficiente psicométrico (kPa/°C);
- λ : calor latente de vaporização (MJ/kg);
- ρ : peso específico da água (kg/m³); e
- R_n : saldo diário de irradiação medido sobre a superfície de água livre (W/m²).

Da mesma forma que para o método de Penman, a variação no armazenamento de calor no reservatório (G) foi considerada nula, devido à inexistência de dados de temperatura do lago e ao fato de que as mudanças na energia armazenada em reservatórios de regiões tropicais podem ser desprezadas.

4.3.6 Comparação entre os métodos de estimativa da evaporação

Segundo Lenters et al. (2005), o método do balanço hídrico pode potencialmente prover estimativas mais confiáveis da evaporação e, portanto, deveria ser utilizado como método padrão para o cálculo da evaporação em reservatórios.

No entanto, em decorrência da dificuldade da aplicação do balanço hídrico em grandes reservatórios, a comparação entre os diferentes métodos foi realizada utilizando-se como referência o método de Penman, o qual foi adotado como padrão por ser mais robusto e fundamentado nos processos físicos que regem o fenômeno da evaporação, através das teorias de balanço de energia e transferência de massa (Pereira et al., 2013); e por ser o método mais utilizado mundialmente para estimar a evaporação de lagos e reservatórios (SIVAPRAGASAM et al., 2009).

No caso da estimativa da evaporação anual, a comparação entre os métodos foi realizada através da análise de variância, no delineamento inteiramente ao acaso, tendo como tratamentos os métodos de estimativa da evaporação (Penman, Linacre, Kohler et al., Morton e deBruin-Keijman) e as repetições foram o número de anos do período-base para cada reservatório. Quando o teste F foi significativo, efetuou-se o procedimento de comparações múltiplas pelo teste de Dunnett, tendo como padrão o método de Penman.

Para fins de comparação das estimativas mensais da evaporação, foi realizada a análise de variância em parcelas subdivididas, com os métodos de estimativa da evaporação (Penman, Linacre, Kohler et al., Morton e deBruin-Keijman) nas parcelas e os meses do ano nas subparcelas, no delineamento em blocos ao acaso, considerando o número de anos do período-base para cada reservatório como bloco. Quando a interação foi significativa, realizou-se o desdobramento da interação entre os fatores, métodos e meses. Foi realizado o teste Dunnett para comparar métodos dentro de cada mês e o teste Tukey para os contrastes entre meses fixando cada método. Entretanto, se o efeito da interação foi não-significativa, realizou-se as comparações no efeito médio geral de cada fator.

Em todas as análises foi considerado nível de significância (α) de 0,05, utilizando-se o Programa SAS para processamento das análises estatísticas.

4.4 Obtenção da vazão média evaporada nos reservatórios

A partir dos valores estimados de taxa de evaporação nos reservatórios foi possível obter a vazão equivalente à lâmina evaporada para os métodos que

apresentarem melhor comportamento, ou seja, que não diferiram estatisticamente do método de Penman nas bases anual e mensal. A vazão evaporada foi obtida através da seguinte equação:

$$Q_{EV} = \frac{EV \times A}{86.400} \quad (54)$$

em que:

- Q_{EV} = vazão evaporada no reservatório (m^3/s);
- EV = taxa de evaporação do reservatório (m/dia); e
- A = área do reservatório (m^2).

Além da vazão evaporada no reservatório, foi calculada também a vazão evaporada líquida, ou seja, descontando-se o que já seria perdido por evapotranspiração real da área correspondente ao espelho d'água do reservatório. A vazão evaporada líquida foi obtida através da seguinte equação.

$$Q_{EVL} = Q_{EV} - Q_{ET} \quad (55)$$

em que Q_{ET} corresponde ao volume anual de água perdida por evapotranspiração considerando a vegetação antecedente que existia na área antes da construção da barragem, em m^3/ano .

A evapotranspiração real relativa ao período anterior à construção dos reservatórios foi determinada através do método do balanço hídrico climatológico proposto por Thornthwaite & Mather (1955) e é apresentada na Tabela 4. 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 (PEREIRA et al., 1997).

Foi empregada, para a aplicação da metodologia do balanço hídrico climatológico, uma rotina computacional desenvolvida por D'angiolella & Vasconcellos (2002), bastando para tal o fornecimento de dados mensais de precipitação, temperatura, insolação, umidade relativa e velocidade do vento. Foram utilizadas as séries históricas de dados de 1994 a 2001 da estação meteorológica de Palmas, para a UHE de Lajeado, e a série de 1976 a 1984 da estação meteorológica de Tucuruí, para a UHE de Tucuruí.

Tabela 4: Evapotranspiração real nas regiões dos reservatórios de Tucuruí e Lajeado antes da sua formação, segundo o balanço hídrico de Thornthwaite & Mather (1955).

Mês	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
Tucuruí	101,9	98,0	108,0	108,6	112,5	101,4	71,0	41,3	33,1	65,8	80,0	107,0
Lajeado	119,7	108,1	115,8	116,6	107,4	47,1	21,4	10,7	29,7	133	121,3	120,1

A quantidade de água perdida por evapotranspiração foi, então, obtida por meio da seguinte equação:

$$Q_{ET} = \frac{ET \times A}{86.400} \quad (56)$$

em que:

- Q_{ET} = vazão evaporada no reservatório (m^3/s);
- ET = taxa de evapotranspiração considerando a vegetação antecedente que existia na área antes da construção da barragem (m/dia); e
- A = área média do reservatório (m^2).

Foram utilizados os dados de vazão natural do rio Tocantins, obtidos em ONS (2014), para fins de comparação com a vazão evaporada dos reservatórios de Tucuruí e Lajeado. O setor elétrico tem adotado o termo vazão natural para identificar a vazão que ocorreria em uma seção do rio caso não houvesse ações antrópicas na sua bacia contribuinte - tais como regularizações de vazões realizadas por reservatórios, desvios de água, evaporações em reservatórios e usos consuntivos (irrigação, criação animal e abastecimentos urbano, rural e industrial).

O ONS (2014) obteve a vazão natural por meio de um processo de reconstituição, que considera a vazão observada no local e as informações relativas às ações antrópicas na bacia. A vazão natural média anual para o rio Tocantins na localidade de Tucuruí é de $10.970 m^3/s$, já a vazão natural média anual na localidade de Lajeado é de $2.430 m^3/s$.

4.5 Estimativa da pegada hídrica dos reservatórios

O cálculo da pegada hídrica das UHEs de Tucuruí e Lajeado foi feito com base nos totais evaporados estimados pelos métodos que não diferiram estatisticamente do método de Penman, nas bases anual e mensal, e na produção total de energia elétrica fornecida pelas companhias Eletronorte e Investco, respectivamente.

Além da PH anual, foram feitas estimativas sazonais, verificando-se os meses do ano em que a mesma é mais crítica, uma vez que a PH depende tanto das condições climáticas da região quanto da demanda de mercado por energia.

Os dados de geração mensal de energia elétrica da UHE de Tucuruí foram fornecidos pela Eletronorte e correspondem ao período-base de 1986 a 1990 e 2001 a 2014, enquanto os dados de geração mensal de energia elétrica da UHE de Lajeado foram fornecidos pela Investco e correspondem ao período de 2002 a 2014 (Figura 6).

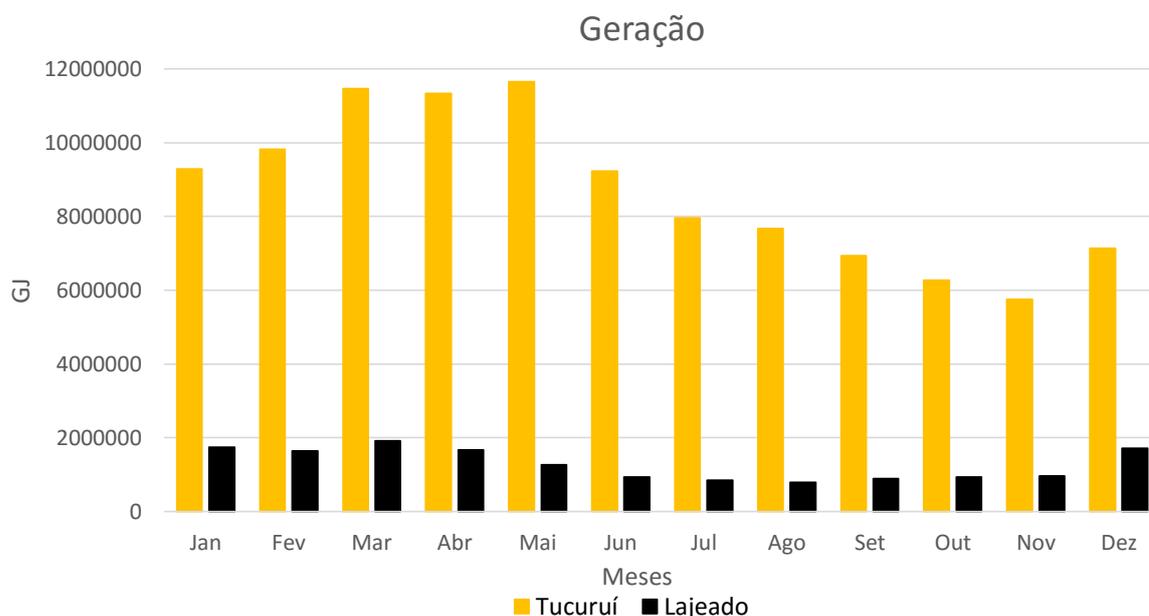


Figura 6: Geração média mensal de energia elétrica das UHEs de Tucuruí e Lajeado.

Foram considerados três diferentes métodos para avaliar a pegada hídrica de hidrelétricas, seguindo a proposta sugerida por Herath et al. (2011).

4.5.1 PH-1: uso consuntivo da água

No primeiro método, foi utilizada a definição de pegada hídrica dada por Hoekstra & Chapagain (2011) que, essencialmente, representa a água consumida no processo considerado. Para a geração de energia hidrelétrica, a PH-1 (m^3/GJ) pode ser calculada como a perda de água por evaporação a partir da superfície do reservatório dividida pela energia produzida pela central hidrelétrica, conforme a equação:

$$PH-1 = \frac{Q_{EV}}{GE} \quad (57)$$

em que:

- PH-1 : pegada hídrica com base no uso consuntivo (m^3/GJ);
- Q_{EV} : quantidade de água perdida por evaporação anualmente no reservatório (m^3/ano); e
- GE : geração anual de energia da usina hidrelétrica (GJ/ano).

4.5.2 PH-2: uso consuntivo líquido

A segunda abordagem também considera o uso consuntivo da água, porém avalia as consequências da mudança no uso do solo criada pela barragem. A pegada hídrica, por este método, é calculada a partir da evaporação líquida, ou seja, descontando o que já seria perdido por evapotranspiração real na área correspondente ao espelho d'água do reservatório. Dessa forma, a PH-2 (m^3/GJ) é estimada pela equação:

$$PH-2 = \frac{(Q_{EV} - Q_{ET})}{GE} \quad (58)$$

em que:

- PH-2 : pegada hídrica com base no uso consuntivo líquido (m^3/GJ); e
- Q_{ET} : quantidade de água perdida por evapotranspiração a partir da vegetação antecedente que teria ocorrido na ausência da barragem (m^3/ano).

4.5.3 PH-3: balanço de água líquido

No terceiro método foi utilizado o balanço hídrico simplificado para estimar a pegada hídrica, considerando as entradas e saídas de água do reservatório. No

balanço hídrico simplificado foram considerados como componentes de entrada e saída, respectivamente, a precipitação e a evaporação.

A evaporação é uma das formas mais evidentes de uso consuntivo de água nos reservatórios hidrelétricos, uma vez que a água evaporada do reservatório normalmente deixa a bacia hidrográfica e, assim, é considerada uma perda verdadeira (HERATH et al., 2011).

Já a água infiltrada geralmente permanece dentro da bacia e é altamente provável que se torne disponível novamente a jusante, ou recarregue recursos hídricos subterrâneos não sendo, portanto, considerada como uma perda verdadeira dos reservatórios (GLEICK, 1994).

No método de PH-3, analisou-se o balanço de água líquido levando-se em consideração a água que sai e entra na superfície do reservatório, ou seja, a evaporação e a precipitação.

A PH-3 (m^3/GJ) para hidroeletricidade, portanto, é a perda líquida de água do reservatório por unidade de energia produzida na usina hidrelétrica, estimada como:

$$PH-3 = \frac{(Q_{EV} - P_a)}{GE} \quad (59)$$

em que:

- PH-3 : pegada hídrica com base no balanço de água líquido (m^3/GJ);
e
- P_a : volume anual de precipitação no reservatório (m^3/ano).

Os volumes correspondentes à E_0 , ET e P foram calculados numa base anual pela multiplicação da média anual de evaporação da superfície livre, evapotranspiração e precipitação, respectivamente, pela respectiva área do reservatório.

4.6 Análise da eficiência hídrica dos reservatórios

A análise da eficiência hídrica das usinas hidrelétrica Tucuruí e Lajeado foi realizada através de uma comparação entre as pegadas hídricas mensais e anuais das hidrelétricas, relacionando-as à área dos reservatórios, à produção de energia e às taxas de evaporação.

Para essa análise foram empregados os valores de pegada hídrica obtidos pelo método do uso consuntivo (PH-1) e a relação entre a área do reservatório e a capacidade instalada de cada hidrelétrica.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Evaporação no reservatório de Tucuruí

5.1.1 Evaporação anual no reservatório de Tucuruí

Os valores de evaporação média anual média para o reservatório de Tucuruí, no período 1986 a 1990 e 2001 a 2014, encontram-se dispostos na Tabela 5 e os resultados da análise de variância para os métodos de estimativa da evaporação são apresentados na Tabela 6.

Tabela 5: Evaporação média anual para o reservatório de Tucuruí

Método	Evaporação média anual (mm/ano)
Penman	1.784
Linacre	1.449*
Kohler	1.285*
Morton	1.267*
deBruin-Keijman	2.001*

*Médias com asterisco na linha diferem do método padrão (Penman) ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Dunnet.

Tabela 6: Análise de variância dos métodos de estimativa da evaporação anual no reservatório de Tucuruí

FV	GL⁽¹⁾	QM⁽²⁾
Método	4	2.091.889**
Resíduo	95	18.427
CV(%)⁽³⁾		8,72

** F Significativo ao nível de 5% de probabilidade; ⁽¹⁾Graus de liberdade; ⁽²⁾Quadrado médio; ⁽³⁾Coeficiente de variação.

Como pode ser observado na Tabela 6, o teste F foi significativo ao nível de 5% de probabilidade para os dados de evaporação média anual, indicando que os métodos de estimativa da evaporação dos reservatórios têm efeito diferenciado ao nível de significância em que foi realizado o teste.

Com base nos dados da Tabela 5, verifica-se que, na base anual, todos os métodos estudados diferiram estatisticamente do método de Penman, considerado

como padrão, pelo teste de Dunnet. Os métodos de Linacre, Kohler et al. e Morton subestimaram os valores de evaporação em relação a Penman em, aproximadamente, 19%, 28% e 29%, respectivamente, enquanto o método de deBruin-Keijman superestimou o média anual de evaporação em 12%.

A subestimativa da evaporação anual pelo método de Kohler et al., em relação ao método de Penman, pode ser decorrente da consideração de que a evaporação no reservatório é de 70% da evaporação que ocorreria em um Tanque Classe A, porém, para áreas úmidas, quando a temperatura da água do tanque for maior que a do ar, o coeficiente do Tanque pode atingir valores próximos a 0,8 (GANGOPADHYAYA et al., 1996). Além disso, a velocidade do vento a 15,2 cm acima do Tanque Classe A, considerada pelo método, é bem menor do que a velocidade a 2 metros de altura, considerada no método de Penman, podendo subestimar a evaporação em relação a este.

O método de Linacre é o único método que considera diretamente a precipitação em sua formulação, de acordo com a Equação 18, o que explica a sua subestimativa em relação à Penman na base anual. A radiação solar incidente na superfície do reservatório é calculada utilizando-se informações de nebulosidade e precipitação, e como a região de Tucuruí apresenta altos índices pluviométricos na maior parte do ano, o método tende a subestimar a radiação incidente e, conseqüentemente, a evaporação.

O método de Morton apresentou a maior subestimativa da evaporação em relação a Penman, com a maior discrepância entre todos os métodos, o que provavelmente decorreu da falta de sensibilidade do método à velocidade do vento (Pereira, et al., 2008). Por outro lado, o método de deBruin-Keijman superestimou a evaporação anual em relação ao método de Penman. Tal comportamento possivelmente decorreu da utilização de uma relação empírica para estimar a constante de Bowen na dedução da equação, que superestima essa constante em relação à utilizada no método de Penman

De maneira semelhante, Leão et al. (2013), estudando o reservatório da barragem de Banabuiú, Ceará, obtiveram um valor subestimado de evaporação anual pelo método de Kohler et al. em relação a Penman, porém o valor obtido por deBruin-Keijman também foi subestimado. Roque & Sansigolo (2001) estimaram a evaporação anual do lago de Taquaraçu, São Paulo, e obtiveram um resultado pelo método de Morton que foi 8% inferior ao obtido pelo método de Penman.

Vieira (2015), estudando os reservatório de Sobradinho (BA) e Três Marias (MG), também obteve valores subestimados para os métodos de Kohler et al. e Morton em relação ao método de Penman, porém obteve valor superestimado para o método de Linacre. Esse comportamento para Linacre é explicado pelo menor índice pluviométrico nessas duas localidades em relação à Tucuruí, uma vez que o método é muito sensível a esse parâmetro.

Mekonnen & Hoekstra (2011a) estimaram a evaporação média anual no reservatório de Tucuruí utilizando o método de Penman, para o período de 1996 a 2005, e obtiveram um valor anual médio de evaporação de 2.378 mm, valor 36% maior ao encontrado no presente trabalho, com a utilização do mesmo método. Isso pode ser explicado pelo fato de que os autores consideraram, no cálculo da evaporação, a variação no armazenamento de calor no corpo d'água. Porém, a temperatura da água não é constante ao longo de todo reservatório, podendo medidas localizadas gerarem superestimativas da evaporação.

De acordo com o teste de Dunnet, portanto, todos os métodos analisados diferem estatisticamente do método padrão, não sendo possível a utilização de nenhum deles para o cálculo da evaporação anual média no reservatório de Tucuruí em substituição ao método de Penman.

5.1.2 Evaporação mensal no reservatório de Tucuruí

Na Figura 7 apresenta-se a distribuição da evaporação média mensal no reservatório de Tucuruí. Os resultados de evaporação para todos os anos do período-base estão disponíveis no Apêndice A.

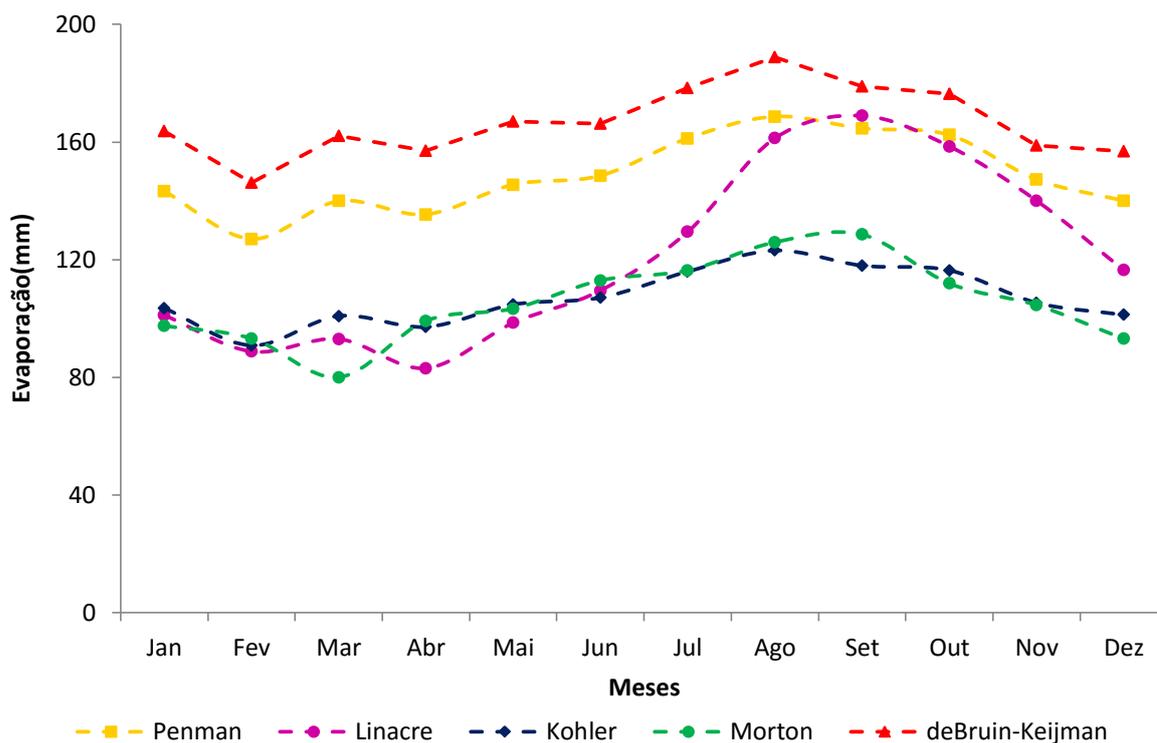


Figura 7: Evaporação média mensal no reservatório de Tucuruí.

Pela análise da Figura 7, observa-se que os métodos de Kohler et al., Morton e deBruin-Keijman apresentaram comportamento sazonal similar ao método de Penman, porém os métodos de Kohler et al. e Morton apresentaram valores de evaporação média mensal inferiores a Penman em todos os meses do ano, enquanto o método de deBruin-Keijman superestimou os resultados em todos os meses do ano.

Verifica-se, ainda, que o método de Linacre teve comportamento totalmente diverso do método de Penman, subestimando a evaporação no período chuvoso, de dezembro a julho, e obtendo valores muito próximos ao padrão no período seco, de agosto a novembro. Tal comportamento é similar ao observado na estimativa da evaporação anual. Isso gera problemas para a gestão de recursos hídricos, pois valores subestimados de evaporação podem causar uma estimativa errônea da disponibilidade hídrica a jusante do reservatório, comprometendo os usos múltiplos da água.

Os resultados da análise de variância para os métodos de estimativa da evaporação são apresentados na Tabela 7 e os valores de evaporação mensal

média no reservatório de Tucuruí, para o período-base, encontram-se dispostos na Tabela 8.

Tabela 7: Análise de variância dos métodos de estimativa da evaporação mensal no reservatório de Tucuruí

FV	GL ⁽¹⁾	QM ⁽²⁾
Bloco	19	3.695,58**
Método	4	174.322,28**
Mês	11	22.161,75**
Método X Mês	44	2.048,59**
Resíduo	1121	203,97
CV(%)⁽³⁾		12,80

** F Significativo ao nível de 5% de probabilidade; ⁽¹⁾Graus de liberdade; ⁽²⁾Quadrado médio; ⁽³⁾Coeficiente de variação.

Tabela 8: Evaporação média mensal em mm para o reservatório de Tucuruí

Mês	Penman	Linacre	Kohler	Morton	deBruin-Keijman
Jan	143,33 d	101,15 ef*	103,55 bcde*	97,55 ef*	163,76 cde*
Fev	127,1 e	88,84 fg*	90,91 e*	93,26 fg*	146,13 f*
Mar	139,97 de	93,06 fg*	100,89 de*	80,09 g*	162,1 de*
Abr	135,43 de	83,16 g*	97,18 de*	99,25 def*	157,09 ef*
Mai	145,54 d	98,55 ef*	104,78 bcde*	103,4 cdef*	166,97 bcde*
Jun	148,59 bcd	109,55 de*	107,13 bcd*	112,97 bcd*	166,26 bcde*
Jul	161,28 abc	129,47 bc*	115,98 abc*	116,4 abc*	178,41 abc*
Ago	168,7 a	161,31 a	123,15 a*	125,96 ab*	188,78 a*
Set	164,67 a	168,96 a	118,02 ab*	128,58 a*	178,93 ab
Out	162,44 ab	158,56 a	116,41 ab*	111,94 bcde*	176,48 abcd
Nov	147,28 cd	140,08 b	105,39 bcde*	104,59 cdef*	158,9 ef
Dez	140,07 dc	116,46 c*	101,28 cde*	93,13 fg*	156,86 ef*

As médias seguidas de pelo menos uma mesma letra na coluna não diferem entre si ao nível de significância de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

*Médias com asterisco na linha diferem do método padrão (Penman) ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Dunnet.

Como pode ser observado na Tabela 7, a interação entre o método de estimativa da evaporação e o mês do ano foi significativa, indicando que os efeitos dos fatores

atuam de forma dependente. Desse modo, os métodos e os meses não puderam ser analisados separadamente, sendo realizado o desdobramento da interação por meio dos testes de Tukey e Dunnet.

Pela análise da Tabela 8 verifica-se que todos os métodos tiveram seus picos de evaporação em período similar do ano. Os métodos de Penman, Kohler et al. e deBruin-Keijman tiveram seus picos nos meses de julho, agosto, setembro e outubro, enquanto Linacre teve valor máximo nos meses de agosto, setembro e outubro e Morton nos meses de julho, agosto e setembro. Os valores mínimos para os métodos de Penman e Linacre ocorreram nos meses de fevereiro, março e abril, enquanto o método de Kohler et al. teve valor mínimo nos meses de novembro a maio. Já o método de Morton teve valores mínimos em fevereiro, março e dezembro, enquanto deBruin-Keijman teve mínimo em fevereiro, abril, novembro e dezembro.

Analisando-se os dados climáticos da estação de Tucuruí (Figura 5), verifica-se que o período seco ocorre nos meses de junho a novembro, o pico de insolação ocorre nos meses de maio a setembro, e o pico de velocidade do vento ocorre nos meses de julho a novembro. Esses fatores explicam porque todos os métodos tiveram seus picos de evaporação dentro do intervalo de julho a outubro. Já a temperatura média mensal é praticamente constante ao longo do tempo, sendo, portanto, pouco determinante nos valores extremos de taxas de evaporação.

Ainda na Figura 5 pode-se perceber que o período chuvoso em Tucuruí ocorre de dezembro a maio, os menores valores de insolação ocorrem nos meses de novembro a abril e os menores valores de velocidade do vento ocorrem de dezembro a junho, o que justifica todos os métodos apresentarem valores mínimos de evaporação no intervalo de novembro a maio.

Na Tabela 8 verifica-se que para os métodos de Kohler et al. e Morton em nenhum mês a evaporação foi estatisticamente igual àquela fornecida pelo método de Penman, sendo que todos os valores, para ambos os métodos, foram subestimados em relação ao padrão. A explicação para a subestimativa da evaporação mensal por esses dois métodos é a mesma fornecida anteriormente para a evaporação anual.

O método de deBruin-Keijman não diferiu estatisticamente de Penman para os meses de setembro, outubro e novembro, sendo que os demais meses tiveram valores superestimados em relação ao padrão. Isso acontece porque neste período ocorre um aumento nos valores de velocidade do vento em Tucuruí, e como o

método de deBruin-Keijman não possui sensibilidade à velocidade do vento, esse fator acaba compensando a superestimava oriunda de sua formulação empírica, já mencionada anteriormente, resultando em valores muito próximos aos obtidos por Penman.

De forma semelhante, o método de Linacre não diferiu estatisticamente de Penman nos meses de agosto, setembro, outubro e novembro. Isso pode ser explicado pelo fato de que o método de Linacre é o único que considera diretamente a precipitação, e como o clima na região possui duas estações bem definidas, o método tende a subestimar a evaporação nos meses com altos índices pluviométricos e a obter resultados mais próximos ao padrão nos meses secos.

Com base nos resultados obtidos verifica-se que todos os métodos analisados diferem estatisticamente do método de Penman na maior parte dos meses do ano, à exceção de Linacre e deBruin-Keijman que apresentam comportamento similar a Penman para ao período mais seco do ano. Considerando que estes dois métodos são mais simples e que necessitam de menor base de dados climáticos do que o método de Penman, pode-se considerar a possibilidade de utilização dos mesmos no cálculo da evaporação mensal no reservatório de Tucuruí no período de seca.

5.2 Evaporação no reservatório de Lajeado

5.2.1 Evaporação anual no reservatório de Lajeado

Os valores de evaporação média anual para o reservatório de Lajeado encontram-se dispostos na Tabela 9 e os resultados da análise de variância para os métodos de estimativa da evaporação são apresentados na Tabela 10.

Tabela 9: Evaporação média anual para o reservatório de Lajeado

Método	Evaporação média anual (mm)
Penman	1.882
Linacre	1.685*
Kohler	1.389*
Morton	1.671*
deBruin-Keijman	1.976*

*Médias com asterisco na linha diferem do método padrão (Penman) ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Dunnet.

Tabela 10: Análise de Variância dos métodos de estimativa da evaporação anual no reservatório de Lajeado

FV	GL⁽¹⁾	QM⁽²⁾
Método	4	665.343**
Resíduo	60	7.664
CV(%⁽³⁾)		5,09

** F Significativo ao nível de 5% de probabilidade; ⁽¹⁾Graus de liberdade; ⁽²⁾Quadrado médio; ⁽³⁾Coeficiente de variação.

Como pode ser observado na Tabela 10, o teste F foi significativo ao nível de 5% de probabilidade, indicando que os métodos têm efeito diferenciado. Ao observar a Tabela 9, verifica-se que todos os métodos apresentaram resultados que diferem estatisticamente do método de Penman, pelo teste de Dunnet. De maneira semelhante à Tucuruí, os métodos de Linacre, Kohler et al. e Morton, aplicados a Lajeado, subestimaram os valores de evaporação em relação a Penman em aproximadamente 10%, 26% e 11%, respectivamente, enquanto o método de deBruin-Keijman superestimou a média anual de evaporação obtida pelo método padrão em 5%. A explicação para os comportamentos dos métodos em relação à Penman na escala anual para Lajeado é a mesma descrita para Tucuruí no item 5.1.1.

Os resultados obtidos para Lajeado com base nos cinco métodos analisados são condizentes com outros trabalhos realizados em reservatórios localizados em regiões de clima tropical com estação seca (Aw). Roque & Sansigolo (2001) obtiveram um valor de evaporação anual de 1.669 mm para o lago de Taquaraçu, São Paulo, pelo método de Penman, e Vieira (2015), utilizando o mesmo método, obteve uma evaporação anual para o reservatório de Três Marias, Minas Gerais, de 1.615 mm.

Analisando-se as Tabelas 5 e 9, verifica-se que a evaporação média anual em Lajeado foi maior que em Tucuruí para todos os métodos analisados, exceto para deBruin-Keijman. Isso ocorre devido ao clima de Lajeado, que por possuir uma estação seca, com baixos índices pluviométricos e alta insolação e velocidade do vento, promove valores de evaporação maiores nesse período. O método deBruin-Keijman, no entanto, apresentou valor menor em Lajeado do que em Tucuruí provavelmente devido à maior latitude da localidade, fator que afeta o saldo de radiação, variável de maior relevância no cálculo da evaporação pelo método.

De acordo com o teste de Dunnet, portanto, todos os métodos analisados diferem estatisticamente do método padrão, não sendo possível a utilização de nenhum deles para o cálculo da evaporação média anual no reservatório de Lajeado em substituição ao método de Penman.

5.2.2 Evaporação mensal no reservatório de Lajeado

Na Figura 8 está apresentada a distribuição da evaporação média mensal no reservatório de Lajeado. Os resultados de evaporação para todos os anos do período-base estão disponíveis no Apêndice A.

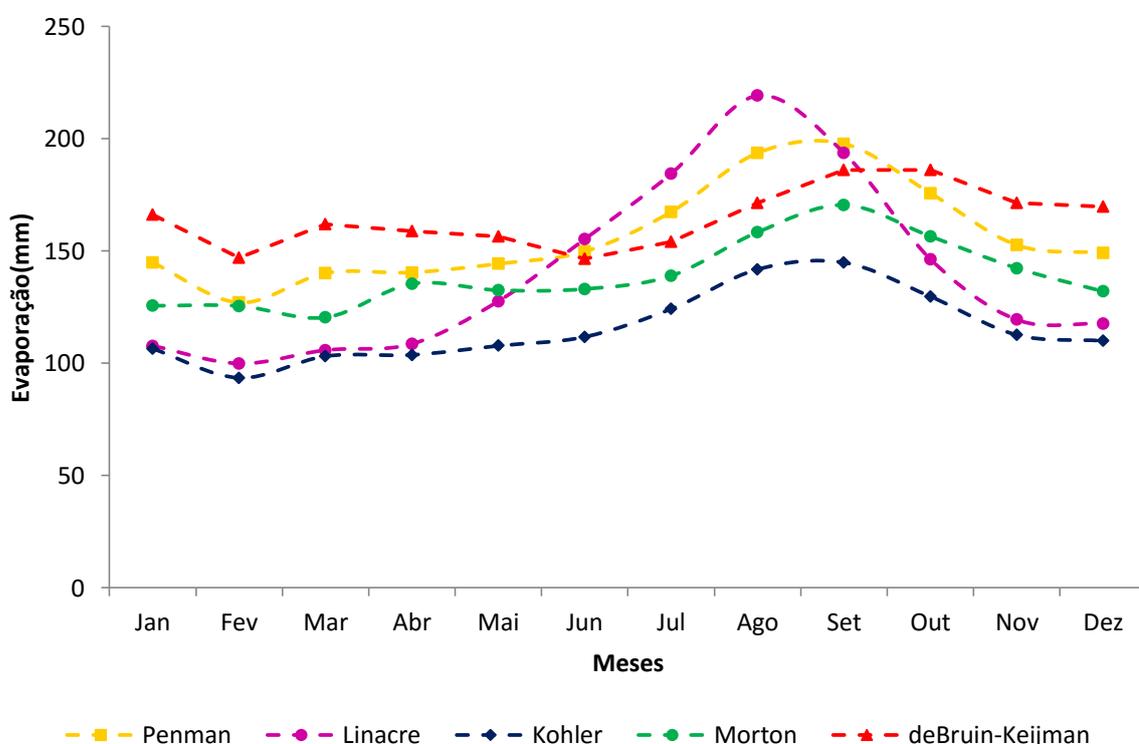


Figura 8: Evaporação média mensal no reservatório de Lajeado.

Pela análise da Figura 8 nota-se que, graficamente, apenas os métodos de Kohler et al. e Morton apresentaram a mesma tendência do método de Penman na maior parte dos meses, apesar de subestimarem os valores em relação ao padrão. Já o método de Linacre apresentou valores superiores aos obtidos por Penman no período seco e valores inferiores no período chuvoso. Observa-se, também, que o método de deBruin-Keijman resultou em valores superiores a Penman nos meses de outubro a maio e valores inferiores no período de junho a setembro.

Os resultados da análise de variância para os métodos de estimativa da evaporação são apresentados na Tabela 11 e os valores de evaporação média

mensal no reservatório de Tucuruí, para o período-base, encontram-se dispostos na Tabela 12.

Tabela 11: Análise de Variância dos métodos de estimativa da evaporação mensal no reservatório de Lajeado

FV	GL ⁽¹⁾	QM ⁽²⁾
Bloco	12	1.453,22**
Método	4	55.444,14**
Mês	11	24.619,10**
Método X Mês	44	2.665,64**
Resíduo	708	172,68
CV(%)⁽³⁾		9,16

** F Significativo ao nível de 5% de probabilidade; ⁽¹⁾Graus de liberdade; ⁽²⁾Quadrado médio; ⁽³⁾Coeficiente de variação.

Tabela 12: Evaporação média mensal em mm para o reservatório de Lajeado

Mês	Penman	Linacre	Kohler	Morton	deBruin-Keijman
Jan	144,79 ef	107,73 ef*	106,46 def*	125,59 de*	166,24 b*
Fev	127,00 f	99,88 f*	93,49 f*	125,49 de	147,00 c*
Mar	140,1 ef	105,82 ef*	103,14 ef*	120,38 e*	161,95 bc*
Abr	140,39 ef	108,58 ef*	103,7 ef*	135,38 de	158,79 bc*
Mai	144,3 ef	127,62 d*	107,75 def*	132,5 de	156,52 bc
Jun	149,76 de	155,26 c	111,73 cdef*	133,05 de*	146,58 c
Jul	167,38 cd	184,38 b*	124,15 bcd*	138,93 cd*	153,95 bc*
Ago	193,63 ab	219,11 a*	141,79 a*	158,34 ab*	171,29 ab*
Set	197,7 a	193,67 b	144,81 ab*	170,44 a*	186,14 a
Out	175,72 bc	146,36 c*	129,69 abc*	156,51 abc*	186,13 a
Nov	152,59 de	119,38 de*	112,6 cde*	142,31 bcd	171,39 ab*
Dez	149,08 de	117,61 def*	109,95 def*	131,95 de*	169,64 ab*

As médias, seguidas de pelo menos uma mesma letra na coluna, não diferem entre si ao nível de significância de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

*Médias com asterisco na linha diferem do método padrão (Penman) ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Dunnet.

Como pode ser observado na Tabela 11, a interação entre os métodos de estimativa da evaporação e o mês do ano foi significativa para Lajeado, indicando

que os efeitos dos fatores atuam de forma dependente. Desse modo, também se fez necessário realizar o desdobramento da interação por meio dos testes de Tukey e Dunnet.

Analisando-se a Tabela 12 pode-se concluir que, para o método de Penman, o pico de evaporação ocorreu nos meses de agosto e setembro e os valores mínimos ocorreram de janeiro a maio. Os métodos de Morton e Kohler et al. apresentaram valores máximos de evaporação nos meses de agosto, setembro e outubro, porém os valores mínimos ocorreram de dezembro a junho. O método de Linacre teve pico de evaporação no mês de agosto e mínimo de evaporação de dezembro a abril. Já o método de deBruin-Keijman teve seu pico nos meses de agosto a dezembro e seu mínimo nos meses de fevereiro a julho.

Pela análise da Figura 5 verifica-se que os menores índices pluviométricos, picos de insolação e de velocidade do vento para a estação de Palmas ocorrem nos meses de maio a setembro. Esses fatores explicam porque a maioria dos métodos tiveram seus picos de evaporação dentro deste intervalo. deBruin-Keijman teve uma variação maior, apresentando seu máximo de evaporação nos meses de agosto a dezembro. Isso é explicado devido ao fato de que a radiação solar incidente na superfície do reservatório é máxima nesses meses em consequência da maior razão de insolação (n/N). A radiação na superfície afeta diretamente o saldo de radiação, variável de maior relevância no cálculo da evaporação pelo método de deBruin-Keijman.

Ainda na Figura 5 pode-se perceber que o período chuvoso na estação de Palmas ocorre de outubro a abril e os menores valores de insolação e velocidade do vento ocorrem, respectivamente, nos meses de dezembro a março e novembro a maio, o que justifica os métodos de Penman, Linacre, Kohler et al. e Morton terem valor mínimo de evaporação dentro deste intervalo. Já deBruin-Keijman teve valor mínimo de evaporação nos meses de fevereiro a julho, devido ao fato de que a radiação solar incidente na superfície do reservatório é mínima nesse mês em consequência da menor razão de insolação (n/N).

Pela Tabela 12 verifica-se que o método de Linacre obteve resultados que não diferiram estatisticamente de Penman apenas nos meses de junho e setembro. Nos meses de julho e agosto o método superestimou a evaporação em relação à Penman, enquanto nos meses de outubro a maio ele subestimou. Da mesma forma que para Tucuruí, isso pode ser explicado pelo fato de que o método de Linacre é o

único que considera diretamente a precipitação, e o método tende a subestimar a evaporação nos meses com altos índices pluviométricos e superestimar nos meses secos.

O método de Kohler et al. diferiu estatisticamente de Penman em todos os meses do ano, sendo que todos os valores foram subestimados em relação ao padrão. Esse comportamento foi idêntico ao encontrado para Tucuruí, e como já foi mencionado anteriormente, decorre do fato de que o método de Kohler et al. pode subestimar os resultados ao considerar que a evaporação no reservatório é 70% da evaporação no Tanque Classe A na ocorrência de altos índices pluviométricos (GANGOPADHYAYA et al., 1996).

Já o método de Morton teve resultados que não diferem estatisticamente do método de Penman apenas nos meses de fevereiro, abril, maio e novembro, sendo os demais valores subestimados em relação ao padrão. Isso ocorre pela falta de sensibilidade do método à velocidade do vento. Quando a velocidade do vento é menor, os resultados se aproximam de Penman, porém no período com maiores velocidades do vento os valores de Morton se afastam do padrão. Esse comportamento foi diferente do encontrado para Tucuruí, onde a evaporação foi subestimada em todos os meses do ano. Isso ocorre porque a velocidade do vento em Tucuruí é constante ao longo do ano e possui valores maiores que Palmas na maioria dos meses, fazendo com que a evaporação seja subestimada em relação à Penman.

O método de deBruin-Keijman teve resultados que não diferiram estaticamente do padrão somente para os meses de maio, junho, setembro e outubro, sendo que este método superestimou a evaporação em relação a Penman em todos os demais meses. Isso acontece, como já mencionado anteriormente, pela compensação entre a superestimava oriunda da formulação empírica e a subestimativa devido à falta de sensibilidade do método à velocidade do vento, resultando em valores muito próximos aos obtidos por Penman. Esse comportamento foi semelhante ao encontrado para Tucuruí, em que os resultados obtidos por deBruin-Keijman não diferiram estatisticamente de Penman apenas para os meses onde ocorrem maiores valores de velocidade do vento.

Com base nos resultados obtidos, verifica-se que todos os métodos analisados diferem estatisticamente do método de Penman na maior parte dos meses do ano

não podendo, portanto, substituí-lo no cálculo da evaporação mensal no reservatório de Lajeado.

5.3 Vazão evaporada nos reservatórios de Tucuruí e Lajeado

Os valores de vazão média anual evaporada nos reservatórios de Tucuruí e Lajeado foram calculados a partir dos resultados de evaporação obtidos pelo método de Penman, já que nenhum dos outros métodos alternativos avaliados apresentou comportamento similar ao padrão em todos os meses do ano.

Na Tabela 13 são apresentados os valores de vazão média anual evaporada nos reservatórios de Tucuruí e Lajeado. Conforme os dados fornecidos pela ONS (2014), a vazão natural média anual do Rio Tocantins em Tucuruí é de 10.970 m³/s e em Lajeado é de 2.430 m³/s. Dessa forma, a vazão evaporada nos reservatórios de Tucuruí e Lajeado correspondem a 1,5% e 1,6% da vazão natural média do rio Tocantins nas localidades estudadas, respectivamente.

Tabela 13: Vazão média anual evaporada nos reservatórios de Tucuruí e Lajeado

Reservatório	Vazão média anual evaporada (m³/s)
Tucuruí	163
Lajeado	38

Vieira (2015), estudando o reservatório de Três Marias, MG, obteve uma vazão evaporada de 39 m³/s, valor muito próximo ao encontrado para o reservatório de Lajeado. Porém, esse valor corresponde a 5,7% da vazão de 688 m³/s do rio São Francisco nessa localidade (ONS, 2014). Essa porcentagem é 2,6 vezes maior do que a encontrada para Lajeado, devido à menor vazão do rio São Francisco em comparação ao rio Tocantins nas respectivas localidades.

Hernandez (2007) calculou a vazão evaporada para o reservatório de Ilha Solteira, SP, cujo reservatório possui 1.223 km² de área, e obteve um valor médio de 69 m³/s, correspondendo a apenas 1,1% da vazão do rio Paraná na localidade estudada, de 6.280 m³/s (ONS, 2014). A razão entre a vazão evaporada e a vazão do rio foi menor em Ilha Solteira do que nas hidrelétricas de Tucuruí e Lajeado, devido às diferentes condições climáticas dos reservatórios e vazões naturais dos cursos d'água.

Os valores de vazão líquida evaporada nos reservatórios de Tucuruí e Lajeado também foram calculados a partir dos resultados de evaporação obtidos pelo método de Penman e de evapotranspiração real relativa ao período anterior à construção dos reservatórios obtidos pelo método do balanço hídrico de Thornthwaite & Mather (1955). Os resultados do balanço hídrico para as estações climatológicas de Tucuruí e Palmas estão disponíveis no Apêndice B.

Na Tabela 14 são apresentados os valores de vazão líquida média anual evaporada nos reservatórios de Tucuruí e Lajeado, correspondentes a 0,6% e 0,7% da vazão natural média do rio Tocantins, respectivamente, na localidade dos reservatórios.

Tabela 14: Vazão líquida média anual evaporada nos reservatórios de Tucuruí e Lajeado

Reservatório	Vazão líquida média anual evaporada (m³/s)
Tucuruí	69
Lajeado	16

Pereira et al. (2009) estimaram a vazão líquida evaporada do reservatório da UHE de Sobradinho, BA e encontraram um valor de 132 m³/s, que corresponde a 5% da vazão natural do rio São Francisco em Sobradinho, de 2.642 m³/s (ONS, 2014). Esse valor foi muito superior ao obtido neste trabalho, o que se justifica pelas altas taxas de evaporação em Sobradinho, devido aos climas semiárido e árido encontrados na região, e ao espelho d'água do reservatório (4.214 km²).

5.4 Pegada hídrica das usinas hidrelétricas

5.4.1 Pegada hídrica da UHE de Tucuruí

As estimativas da pegada hídrica média anual para o reservatório de Tucuruí, conforme as metodologias PH-1 (pegada hídrica com base no uso consuntivo da água), PH-2 (pegada hídrica com base no uso consuntivo líquido) e PH-3 (pegada hídrica com base no balanço de água líquido) e calculadas com a evaporação obtida pelo método de Penman, encontram-se na Tabela 15.

Tabela 15: Estimativa da Pegada Hídrica média anual para o reservatório de Tucuruí

Pegada hídrica (m³/GJ)	
PH-1	49
PH-2	26
PH-3	-21

Pode-se observar pela Tabela 15 que o valor médio da PH-1 foi de 49 m³/GJ, confirmando o valor obtido por Mekonnen & Hoekstra (2011a) para a UHE de Tucuruí, utilizando a mesma metodologia. Já a pegada hídrica média de Tucuruí estimada pelo método PH-2 foi de 26 m³/GJ. Esse resultado é inferior ao obtido pelo método PH-1 em 47%, uma vez que a evaporação líquida é menor do que a evaporação total no reservatório.

Pelo método PH-3 a hidrelétrica de Tucuruí apresentou valor médio de pegada hídrica de -21 m³/GJ. A estimativa da pegada hídrica de acordo com o método PH-3 reflete a oferta de água doce da região, incorporando as entradas de água e, assim, dando informações detalhadas sobre consumo volumétrico de água azul de uma forma mais apropriada que os demais métodos (ARNØY, 2012). A diferença do método PH-3 em relação aos outros métodos (PH-1 e PH-2) é que ele contabiliza a água que entra no sistema via precipitação e não somente a água que sai por evaporação.

Na Figura 9 encontra-se a distribuição das pegadas hídricas da UHE de Tucuruí ao longo do ano, para cada uma das metodologias de PH utilizadas.

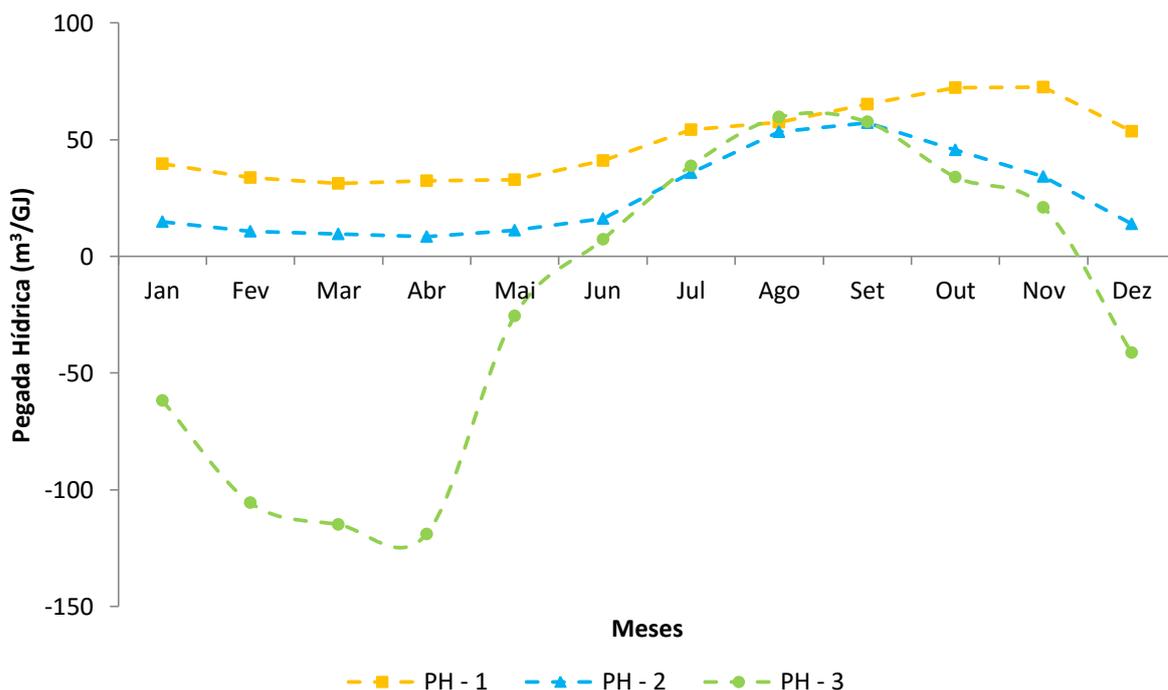


Figura 9: Pegada hídrica da UHE de Tucuruí para as metodologias PH-1, PH-2 e PH-3 calculadas a partir das taxas de evaporação estimadas pelo método de Penman.

Na Figura 9 verifica-se que os maiores valores mensais da PH-1 coincidem com os picos de evaporação e com a menor produção de energia elétrica pela UHE. A PH-1 atingiu valor máximo nos meses de outubro e novembro, de $72 \text{ m}^3/\text{GJ}$. No mês de fevereiro, foi observado o menor valor de pegada hídrica, em função das menores taxas de evaporação e maiores taxas de geração de energia, chegando ao valor mínimo de $31 \text{ m}^3/\text{GJ}$.

Pela distribuição da PH-2, observa-se que seus valores se aproximam da PH-1 nos meses de agosto e setembro, período onde a evapotranspiração real na área anterior à construção do reservatório é menos expressiva, como pode ser observado na Tabela 4. Observa-se também que os valores negativos de PH-3 ocorrem nos meses chuvosos, de dezembro a maio, quando o reservatório recebe mais água em forma de precipitação do que perde em forma de evaporação, devido ao clima úmido da região.

De uma perspectiva da pegada hídrica, é uma vantagem para as hidrelétricas estarem localizadas em regiões úmidas e/ou áreas com baixas taxas de evaporação de superfícies livres de água, pois assim os reservatórios recebem muito mais água oriunda da precipitação do que perdem por evaporação e este excedente líquido de

água prontamente disponível pode fornecer uma série de outros serviços ecossistêmicos às comunidades ribeirinhas ou, possivelmente, até mesmo desserviços, a jusante da barragem (HERATH et al., 2011).

Desse modo, o método PH-3 deve ser utilizado para a decisão sobre a alocação de hidrelétricas quando existe mais de uma alternativa locacional para sua implantação, devendo-se priorizar os projetos em que a PH-3 apresente menor valor, ou seja, locais em que os índices pluviométricos são maiores e, conseqüentemente, os impactos advindos da evaporação do reservatório serão menores.

5.4.2 Pegada hídrica da UHE de Lajeado

As estimativas da pegada hídrica média anual para o reservatório de Lajeado, calculadas com a evaporação obtida pelo método de Penman, com base no uso consuntivo da água (PH-1), no uso consuntivo líquido (PH-2) e no balanço de água líquido (PH-3) encontram-se na Tabela 16.

Tabela 16: Estimativas da pegada hídrica média anual para o reservatório de Lajeado

Pegada hídrica (m³/GJ)	
PH-1	95
PH-2	48
PH-3	21

Pode-se observar pela Tabela 16 que o valor médio da PH-1 da UHE Lajeado foi de 95 m³/GJ, valor esse muito superior ao encontrado para Tucuruí. Isso ocorre porque a taxa de evaporação no reservatório de Lajeado é maior e sua geração de energia é bem menor, quando comparada à Tucuruí.

A pegada hídrica média de Lajeado estimada pelo método PH-2 foi de 48 m³/GJ, resultado também inferior, em aproximadamente 50%, ao obtido pelo método PH-1 devido à alta evapotranspiração existente na área anterior a construção da UHE. Já pelo método PH-3, a hidrelétrica de Lajeado apresentou valor médio de pegada hídrica de 21 m³/GJ, também inferior aos obtidos pelos dois métodos baseados no uso consuntivo.

Na Figura 10 encontra-se a distribuição das pegadas hídricas da UHE de Lajeado ao longo do ano, para cada uma das metodologias de PH utilizadas.

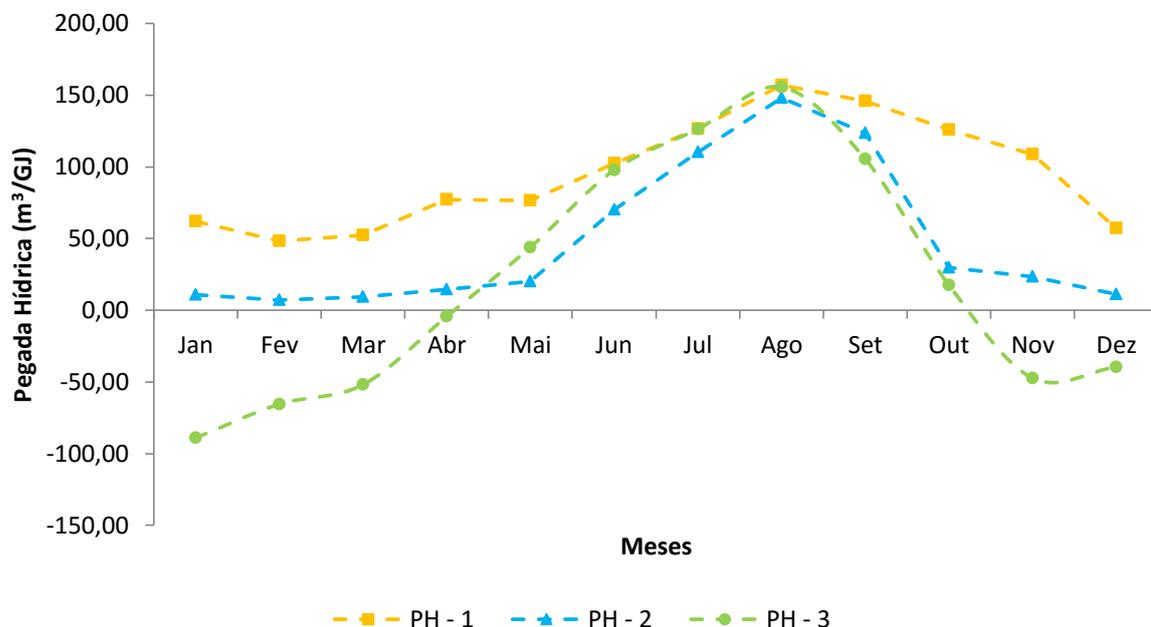


Figura 10: Pegadas hídricas da UHE de Lajeado calculadas a partir das taxas de evaporação estimadas pelo método de Penman.

Na Figura 10 observa-se que, da mesma forma que para Tucuruí, os maiores valores mensais da PH-1 coincidem com os picos de evaporação e com a menor produção de energia elétrica pela UHE de Lajeado. A PH-1 atingiu valor máximo de 157 m³/GJ no mês de agosto. O mês de fevereiro também teve a menor PH-1 para Lajeado, em função das menores taxas de evaporação e maiores taxas de geração de energia, atingindo o valor de 48 m³/GJ.

Pela distribuição da PH-2, observa-se que seus valores se aproximam da PH-1 nos meses de junho, julho, agosto e setembro, período em que a evapotranspiração real na área anterior à construção do reservatório foi menos expressiva, como visto na Tabela 4.

Observa-se também que a UHE de Lajeado apresentou valores de PH-3 negativos para todos os meses do período chuvoso, porém mostrou valores altos de pegada hídrica no período seco, resultando num valor médio positivo. Do mesmo modo que foi explicitado para Tucuruí, nos meses chuvosos o reservatório recebe mais água em forma de precipitação do que perde em forma de evaporação, aumentando o volume do reservatório e a vazão a jusante.

5.4.3 Comparação entre as pegadas hídricas das UHEs de Tucuruí e Lajeado

Na Figura 11 encontra-se a distribuição da pegada hídrica da UHEs de Tucuruí e Lajeado ao longo do ano considerando a metodologia PH-1.

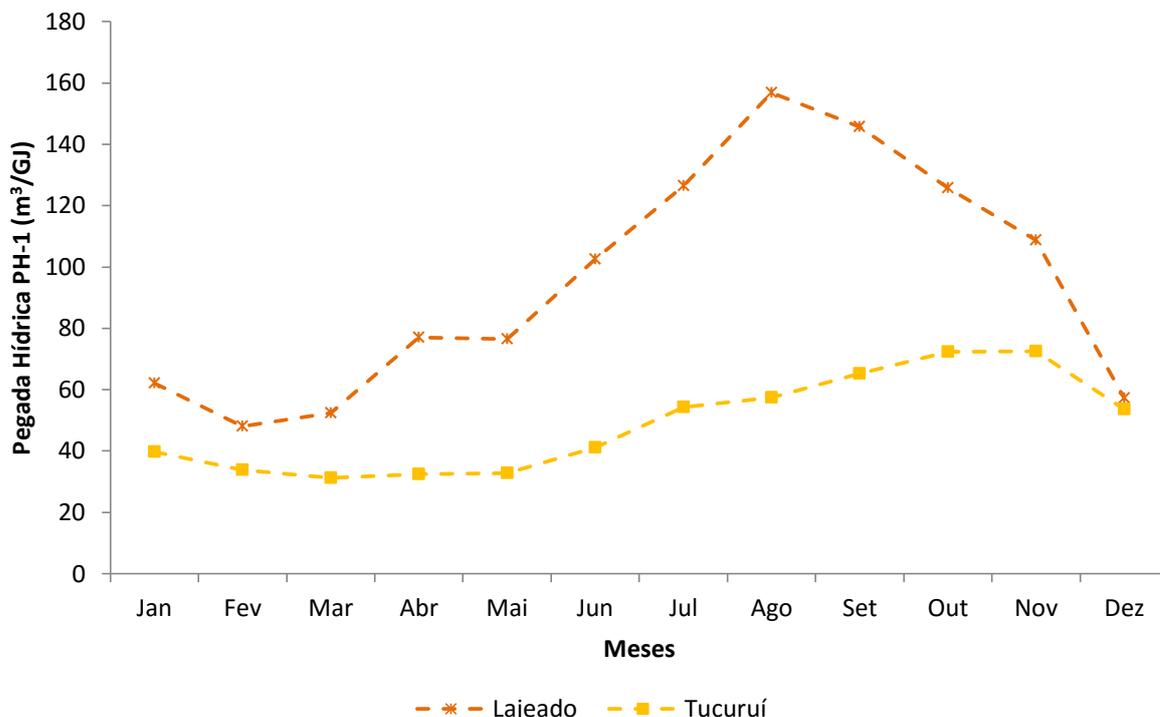


Figura 11: Pegada hídrica da UHEs de Tucuruí e Lajeado calculadas pelo método PH-1.

Como pode ser observada pela Figura 11, a pegada hídrica PH-1 para a hidrelétrica de Tucuruí foi menor que para Lajeado em todos os meses do ano, o que demonstra a sua maior eficiência do ponto de vista hídrico.

Apesar da área do reservatório de Tucuruí ser 3,6 vezes maior do que a área do reservatório de Lajeado, a sua capacidade instalada é 8,3 vezes maior, o que contrabalança a sua maior vazão evaporada. A diferença entre as duas hidrelétricas é mais expressiva nos meses secos devido ao fato da estiagem ser mais rigorosa em Lajeado que em Tucuruí, fazendo com que as perdas por evaporação sejam ainda maiores e que haja também uma queda na produção de energia nesse período, já que a UHE Lajeado é a “fio d’água”.

As diferenças entre as pegadas hídricas de diversas hidrelétricas podem ser, em parte, explicadas pelas diferenças nas taxas de evaporação, no entanto, a razão

entre a superfície do reservatório e sua capacidade hidroelétrica instalada tem um impacto muito maior no resultado final da pegada hídrica da hidroeletricidade (MEKONNEN & HOEKSTRA, 2011a). As usinas hidrelétricas que inundam uma grande área por unidade de capacidade instalada tem uma pegada hídrica, em geral, maior do que aquelas que inundam uma pequena área por unidade de capacidade instalada. A média da área do reservatório por unidade de capacidade instalada da hidrelétrica de Tucuruí é de 34 ha/MW, enquanto para Lajeado esse valor chega a 70 ha/MW, explicando, portanto, a razão da maior pegada hídrica para essa hidrelétrica.

Mekonnen & Hoekstra (2011a) calcularam a pegada hídrica com base no uso consuntivo da água (PH-1) para 35 hidrelétricas espalhadas ao longo do globo e obtiveram um valor médio de 68 m³/GJ. Das 35 usinas estudadas por Mekonnen & Hoekstra (2011a), oito estão localizadas em território brasileiro e, nesse caso, a média da PH-1 foi de 86 m³/GJ. Dessa forma, o valor encontrado para a UHE de Tucuruí (49 m³/GJ) está abaixo da média global e nacional, enquanto o valor encontrado para Lajeado está acima das médias global e nacional tendo, portanto, um maior custo hídrico para produção de energia.

Vários autores obtiveram estimativas de pegada hídrica com base no uso consuntivo da água para diversos países ao longo do globo. Torcelline et al. (2003) estimaram a pegada hídrica, PH-1, das 120 maiores hidrelétricas dos Estados Unidos e obtiveram um valor médio para o país de 19 m³/GJ, enquanto Herath et al. (2011) chegaram a um valor médio de 6,05 m³/GJ para a Nova Zelândia. Já Arnøy (2012), obteve para a hidrelétrica de Høyanger, na Noruega, um valor de PH-1 de 1,21 m³/GJ, enquanto Liu et al. (2015) obtiveram para a China um valor médio de 3,6 m³/GJ.

Como pode ser observado, os valores de PH-1 encontrados tanto para Tucuruí quanto para Lajeado estão muito acima da maior parte dos valores encontrados na literatura. Isso ocorre porque a maior parte dos trabalhos de pegada hídrica de hidroeletricidade foram desenvolvidos em países de clima subtropical ou temperado, onde a eficiência de geração é maior e as taxas de evaporação são inferiores às de países de clima tropical, como o Brasil.

Na Figura 12 encontra-se a distribuição da pegada hídrica da UHEs de Tucuruí e Lajeado ao longo do ano considerando a metodologia PH-2.

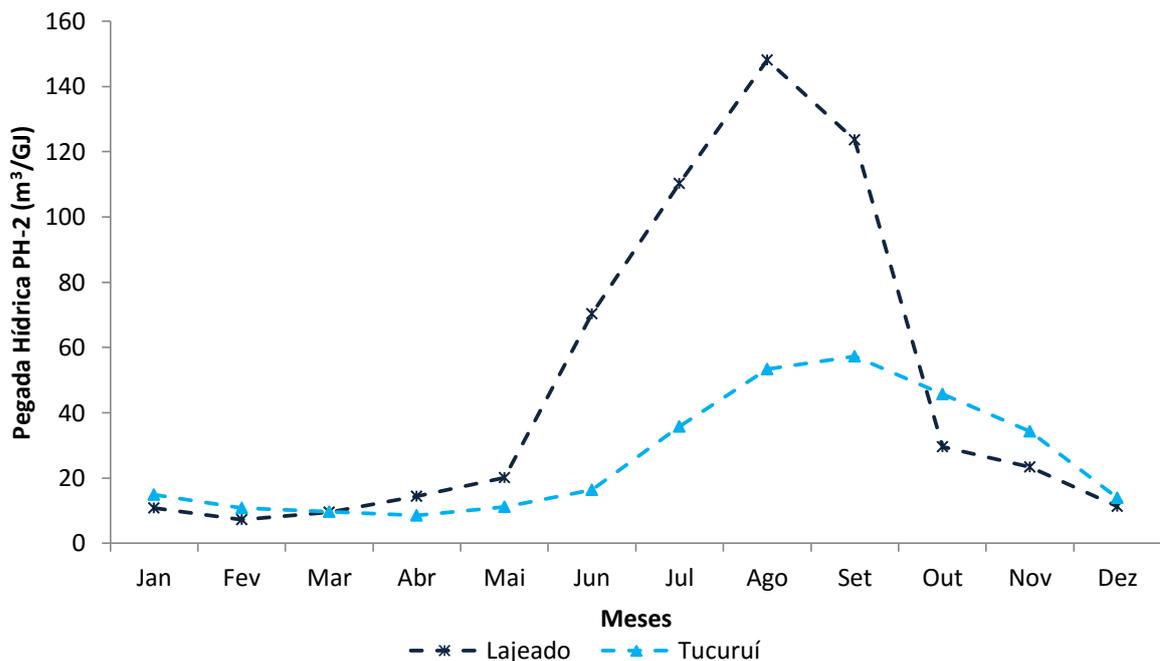


Figura 12: Pegada hídrica da UHEs de Tucuruí e Lajeado calculadas pelo método PH-2.

Como pode ser observada pela Figura 12, as estimativas da pegada hídrica PH-2 para as hidrelétricas de Tucuruí e Lajeado se aproximam no período de outubro a maio, sendo que nos meses de outubro a fevereiro a PH-2 é ligeiramente maior em Tucuruí e nos meses de abril e maio ela é maior em Lajeado. Isso ocorre porque no período chuvoso a evapotranspiração anterior à construção dos reservatórios é maior em Lajeado que em Tucuruí (Tabela 4), diminuindo, em maior proporção, a vazão líquida evaporada no reservatório e, conseqüentemente, sua pegada hídrica.

No período de junho a setembro, as estimativas da PH-2 de Lajeado são, em média, 3 vezes superiores às encontradas em Tucuruí. Isso ocorre porque além de a estiagem ser mais rigorosa em Lajeado, fazendo com que as perdas por evaporação sejam maiores e a produção de energia menor, a evapotranspiração real anterior à construção do reservatório é também menor nessa localidade que em Tucuruí.

Apesar das duas hidrelétricas possuírem pegadas hídricas semelhantes no período chuvoso, a evaporação de água nos reservatórios no período seco é determinante no cálculo da pegada hídrica média anual. Como pode ser observado nas Tabelas 15 e 16, a PH-2 média anual de Lajeado é quase duas vezes maior que a de Tucuruí comprovando, assim, a sua menor eficiência energética.

Herath et al. (2011) aplicaram a metodologia de pegada hídrica com base no uso consuntivo líquido, PH-2, a diversos reservatórios de usinas hidrelétricas na Nova

Zelândia e obtiveram um valor médio de 2,72 m³/GJ, valor este 89% menor que o obtido para Tucuruí e 94% menor que o obtido para Lajeado. Isso ocorre porque os reservatórios da Nova Zelândia possuem menores taxas de evaporação anual, menores áreas e maior eficiência na geração de energia.

Na Figura 13 apresenta-se a distribuição da pegada hídrica da UHEs de Tucuruí e Lajeado ao longo do ano considerando a metodologia PH-3.

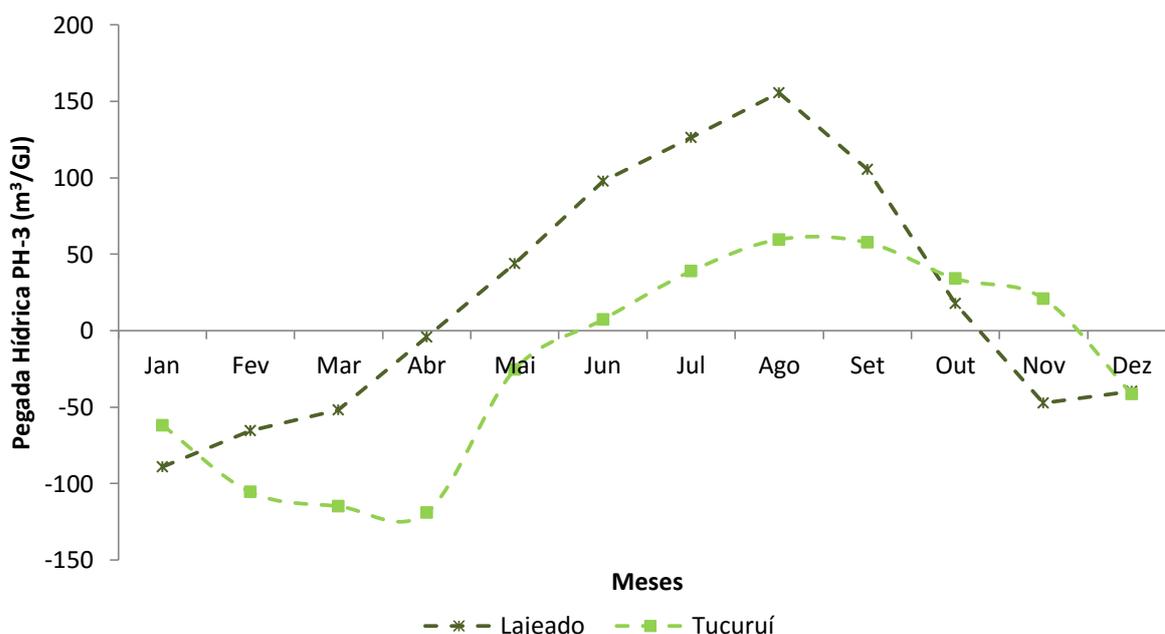


Figura 13: Pegada hídrica da UHEs de Tucuruí e Lajeado calculadas pelo método PH-3.

Na Figura 13 pode-se verificar que tanto a hidrelétrica de Tucuruí quanto a de Lajeado apresentaram, pelo método PH-3, valores negativos de pegada hídrica nos meses chuvosos e valores positivos nos meses secos. Como foi mencionado anteriormente, quando o reservatório recebe mais água em forma de precipitação do que perde na forma de evaporação, a pegada hídrica se torna negativa, demonstrando que o reservatório tem, na verdade, um saldo positivo de água disponível para ser prontamente utilizada a jusante.

Assim como nos outros métodos, a PH-3 foi maior em Lajeado que em Tucuruí para os meses secos, devido ao que já foi mencionado para o método PH-1, e também pelos baixos índices pluviométricos encontrados na região nesse período. Também por esse método pode-se comprovar a superioridade de Tucuruí em relação à eficiência hídrica, uma vez que sua PH-3 média anual é duas vezes menor que a de Lajeado.

Os únicos autores que estimaram a pegada hídrica pelo balanço de água líquido, PH-3, foram Herath et al. (2011), para a Nova Zelândia, e Arnøy (2012), para a hidrelétrica de Høyanger, na Noruega. Os valores obtidos por eles foram, respectivamente, de 1,55 m³/GJ e 0,013 m³/GJ. Verifica-se, portanto, que o valor estimado de PH-3 para Tucuruí foi inferior ao encontrado pelos autores citados. Já a UHE de Lajeado obteve um valor de PH-3 superior aos encontrados na literatura por estar localizada em uma região com estação seca bem definida, com índices pluviométricos próximos de zero e altas taxas de evaporação, o que gera altos valores de PH-3 nesse período, contrabalanceando os valores negativos de PH-3 nos meses chuvosos.

6. CONCLUSÕES

Com base nos objetivos propostos no presente estudo e os resultados obtidos, pode-se concluir que:

- As evaporações médias anuais nos reservatórios de Tucuruí e Lajeado, estimadas pelo método de Penman, foram similares, com valores de 1.784 mm e 1.882 mm, respectivamente;
- Os métodos de Linacre; Kohler et al.; Morton e deBruin & Keijman não podem ser utilizados para a estimativa da evaporação média anual nos reservatórios de Tucuruí e Lajeado em substituição ao método de Penman;
- Os métodos de Linacre e deBruin & Keijman apresentam comportamento similar ao método Penman para o período mais seco do ano em Tucuruí, podendo ser utilizados para a estimativa da evaporação mensal do reservatório neste período;
- Para Lajeado, o método de Morton teve resultados similares a Penman nos meses em que a velocidade do vento é baixa, porém no período com maiores velocidades do vento os valores de Morton se afastaram do padrão em decorrência da falta de sensibilidade do método à velocidade do vento;
- Para Tucuruí, a evaporação foi subestimada em todos os meses do ano pelo método de Morton em função da velocidade do vento ser constante ao longo do ano e possuir valores maiores que em Lajeado na maioria dos meses, fazendo com que a evaporação seja subestimada em relação à Penman;
- Tanto em Tucuruí como em Lajeado, o método de deBruin & Keijman teve resultados que não diferiram estaticamente do padrão para os meses onde ocorrem maiores valores de velocidade do vento em função da compensação entre a superestimava oriunda da formulação empírica e a subestimativa devido à falta de sensibilidade do método à velocidade do vento, resultando em valores muito próximos aos obtidos por Penman;
- As vazões médias anuais evaporadas nos reservatórios de Tucuruí e Lajeado, obtidas a partir do método de Penman, foram de 163 m³/s e 38 m³/s, correspondendo a 1,5% e 1,6% da vazão natural média do rio Tocantins nas respectivas localidades;
- As vazões líquidas médias anuais evaporadas nos reservatórios de Tucuruí e Lajeado, obtidas a partir do método de Penman, foram de 69 m³/s e 16 m³/s,

correspondendo a 0,6% e 0,7% da vazão natural média do rio Tocantins nas respectivas localidades;

- A evaporação em reservatórios de usinas hidrelétricas pode ser considerada como um uso consuntivo dos recursos hídricos para a produção de energia hidroelétrica na região hidrográfica do Tocantins-Araguaia.
- As estimativas da pegada hídrica média anual com base no uso consuntivo da água (PH-1), no uso consuntivo líquido (PH-2) e no balanço de água líquido (PH-3) foram de 49 m³/GJ, 26 m³/GJ e -21 m³/GJ para Tucuruí e de 95 m³/GJ, 48 m³/GJ e 21 m³/GJ para Lajeado, respectivamente; e
- A maior pegada hídrica para a hidrelétrica de Lajeado e, portanto, menor eficiência hídrica, decorre da pior relação entre a área do reservatório e a sua capacidade instalada, que é de 70 ha/MW, enquanto que para Tucuruí essa relação é de 34 ha/MW.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUILAR, S., LOUW, K., AND NEVILLE, K. IHA World Congress Bulletin, **International Institute for Sustainable Development (IISD) and International Hydropower Association (IHA)**, Issue 1, Vol. 139, No. 5, available at: www.iisd.ca/yimb/hydro/iha2011, 2011.
- ALLEN, R.G. **Ref-Et**. Reference evapotranspiration calculator, Version 2.1. Idaho: Idaho University, 82 p. 2000.
- ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. Grop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. FAO irrigation and drainage. Roma: **Food and Agriculture Organization of the United Nations**, 328 p., (Paper, 56), 1998.
- ANA. **Plano estratégico de recursos hídricos da bacia hidrográfica dos rios Tocantins e Araguaia: Relatório Síntese**. Agência Nacional de Águas. Brasília: ANA; SPR, 2009.
- ANA. **Região Hidrográfica do Tocantins-Araguaia**, 2015. Disponível em: <http://www2.ana.gov.br/Paginas/portais/bacias/TocantinsAraguaia.aspx>. Acesso em: 06 abril 2015.
- ANEEL. Banco de Informações de Geração. Capacidade de Geração do Brasil. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.cfm> Acesso em: 19 outubro 2015,
- ANEEL. **Atlas de energia elétrica do Brasil** / Agência Nacional de Energia Elétrica. 3. ed. – Brasília: Aneel, 236 p., 2008.
- ARNØY, S. **Water Footprint Approaches in Life Cycle Assessment: State-of-the-Art and a Case Study of Hydroelectric Generation in the Høyanger Area**, Master's thesis at Norwegian University of Life Sciences (UMB), Ås, Norway, 2012.
- BRASIL. **Normais Climatológicas: 1961-1990**. Ministério da Agricultura, Departamento Nacional de Meteorologia. 1992.
- BOUCHET, R.J. Evapotranspiration réelle et potentielle, signification climatque. **International Association of Scientific Hydrology**, n. 62, p. 134-142, 1963.
- BRANCHE, E. Sharing the water uses of multipurpose hydropower reservoirs: the SHARE concept. Multipurpose water uses of hydropower reservoirs. **Electricité de France & World Water Council**, 111 p., 2015.
- BUENO, E. O. **Evaporação do reservatório da Usina Hidrelétrica de Camargos: caracterização da pegada hídrica**. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas) – Universidade Federal de Lavras, 82 p., Lavras, MG, 2014.

- BURMAN, L; POCHOP, L. O. Evaporation, evapotranspiration and climate data. **Developments in Atmospheric Science**, Elsevier, v. 22, 278p., Amsterdam 1994.
- CAMARGO, A. P; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativas da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 5, n. 1, p. 89–97, 1997.
- CELTINS. Relatório de Análise Ambiental -Programa De Investimentos Celtins 2006-2010. **Companhia de Energia Elétrica do Estado do Tocantins**, Tocantins, Brasil, 2006.
- COOLEY, H.; FULTON, J.; AND GLEICK, P. **Water for energy: Future water needs for electricity in the Intermountain West**, Pacific Institute, Oakland, USA, 2011.
- D'ANGIOLELLA, G. L. B.; VASCONCELLOS, V. L. D. **Cálculo do balanço hídrico climatológico com diferentes métodos para estimativa da evapotranspiração potencial, em planilhas Excel™**. XII Congresso Brasileiro de Meteorologia. Foz do Iguaçu, PR, 2002.
- DE BRUIN, H. A. R.; A simple model for shallow lake evaporation. *Journal of Applied Meteorology*, v.17, p.1132-1134, 1978.
- DE BRUIN, H. A. R.; KEIJMAN, J. Q. The Priestley-Taylor evaporation model applied to a large, shallow lake in the Netherlands. **Journal of Applied Meteorology**, v. 18, n. 7, p. 898-903, 1979.
- DESSIE, M.; VERHOEST, N. E.; PAUWELS, V. R.; ADGO, E.; DECKERS, J.; POESEN, J.; NYSSSEN, J. Water balance of a lake with floodplain buffering: Lake Tana, Blue Nile Basin, Ethiopia. **Journal of Hydrology**, v. 522, p. 174-186, 2015.
- DE SOUZA, R. M.; DA SILVA, M. R.; SOARES, J. E. M.; HOLLUNDER, V. **Plano Municipal de Saneamento Básico de Palmas-TO**. Prefeitura de Palmas - Secretaria Municipal de Assuntos Jurídicos. Palmas, p. 119, 2014.
- DA SILVA, V. D. P.; ALEIXO, D. D. O.; NETO, J. D.; MARACAJÁ, K. F.; DE ARAÚJO, L. E. Uma medida de sustentabilidade ambiental: Pegada Hídrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 17, n. 1, p. 100-105, 2013.
- ELETROBRAS **.Eletrobras Eletronorte. Tucuruí, 2015**. Disponível em: <<http://www.eln.gov.br/opencms/opencms/pilares/geracao/estados/tucuruí/>>. Acesso em: 01 abril 2015.
- ELSAWWAF, M.; WILLEMS, P.; PAGANO, A.; BERLAMONT, J. Evaporation estimates from Nasser Lake, Egypt, based on three floating station data and Bowen ratio energy budget. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 100, n. 3-4, p. 439-465, 2010.

- FERNANDES, C. T. C.; BURSZTYN, M. A. A. Usos Múltiplos das Águas de Reservatórios de Grandes Hidrelétricas: perspectivas e contradições ao desenvolvimento regional sustentável. **Anais do IV Encontro Nacional da Associação Nacional de Pós-Graduação e Pesquisa em Ambiente e Sociedade. Brasília: DF, 2008**
- FERREIRA, C. C. Previsão de Vazões Naturais Diárias Afluentes ao Reservatório da UHE Tucuruí Utilizando a Técnica de Redes Neurais Artificiais. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica e de Computação) – Universidade Federal de Goiás, Goiânia, GO, 99 p., 2012.
- FINCH, J.; HALL, R. L. Estimation of open water evaporation. A Review of Methods R&D Technical Report W6-043/TR. Environment Agency, Rotherham, UK, 2001.
- FISCH, G. F.; JANUÁRIO, M.; SENNA, R. C. Impacto ecológico em Tucuruí-PA: Climatologia. **Acta Amazonica**.v.29, p.49-60, 1990.
- FONTES, A.S. **Estudo da evaporação em reservatórios situados em região semi-árida: uso de bacia experimental**. 2005. 210 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental e Urbana) – Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, 2005.
- FREITAS, A. O.; TAVARES; S. G.; SANTOS; R. D. S.; OLIVEIRA, M. C. Estudos bioclimáticos e tecnologias para elaboração de projeto arquitetônico em Palmas (TO). XIII Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente. Canela, RS, 2010.
- GALVÃO, J.; BERMANN, C. Crise hídrica e energia: conflitos no uso múltiplo das águas. **Estudos Avançados**, v. 29, n. 84, p. 43-68, 2015.
- 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, (Tech. Note N°83, WMO-N°201, TP 105), 121 p. ,1966.
- GERBENS-LEENES, P.W.; HOEKSTRA, A.Y.; VAN DER MEER, T. H. The water footprint of energy from biomass: a quantitative assessment and consequences of an increasing share of bio-energy in energy supply. **Ecological Economics**, v.68, n. 4, p.1052-1060, 2008.
- GIADROSSICH, F.; NIEDDA, M.; COHEN, D.; PIRASTRU, M. Evaporation in a Mediterranean environment by energy budget and Penman methods, Lake Baratz, Sardinia, Italy. **Hydrology and Earth System Sciences Discussion**, v.12, p.1901-1940, 2015.
- GIONGO, P. R.; VETTORAZZI, C. A. Albedo da superfície por meio de imagens TM-Landsat 5 e modelo numérico do terreno. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, n.8, p.833–838, 2014.
- GLEICK, P. **Water and energy**. Annual Review of Energy and the Environment, v.19, p. 267- 299, 1994.

- HERATH, I.; DEURER, M.; HORNE, D.; SINGH, R.; CLOTHIER, B. The water footprint of hydroelectricity: a methodological comparison from a case study in New Zealand. **Journal of Cleaner Production**, v. 19, n. 14, p. 1582-1589, 2011.
- HERNANDEZ, F. B. T. **Análise agroclimática da área de influência do Reservatório da Usina Hidrelétrica de Ilha Solteira, região noroeste do Estado de São Paulo**. Ilha Solteira: UNESP, FEPISA e SEAP/PR (Convênio 80/2005), 2007.
- HICKS, B. B.; HESS, G. D. On the Bowen ratio and surface temperature at sea. **Journal of Physical Oceanography**, v. 7, n. 1, p. 141-145, 1977.
- HOEKSTRA, A. Y.; CHAPAGAIN, A. K.; ALADAYA, M. M. **Manual de Avaliação da Pegada Hídrica: Estabelecendo o Padrão Global**. Water Footprint Network, 2011.
- HOEKSTRA, A. Y.; WIEDMANN, T. O. Humanity's unsustainable environmental footprint. **Science**, v. 344, n. 6188, p. 1114-1117, 2014.
- IEA. **WORLD ENERGY OUTLOOK 2012**. Paris: International Energy Agency, 672 p., 2012.
- IEA. **WORLD ENERGY OUTLOOK 2010**. Paris: International Energy Agency, 738 p. 2010.
- INVESTCO. **Usina Hidrelétrica Luis Eduardo Magalhães**. Disponível em: <<http://www.investco.com.br/>> Acesso em: 27 jul 2015.
- KOHLER, M.A.; NORDENSEN, T.J.; FOX, W.E. Evaporation from pans and lakes, U.S. **Weather Bureau Research**, n. 38, p. 1-21, 1955.
- KOHLER, M. A.; PARMELE, L. H. Generalized estimates of free-water evaporation. **Water Resources Research**, v. 3, n. 4, p. 997-1005, 1967.
- LEÃO, R.A.O.; SOARES, A.A.; TEIXEIRA, A.S.; SILVA, D.D. Estimativa da evaporação no açude Banabuiú, no Estado do Ceará, por diferentes métodos combinados, derivados da equação de Penman. **Engenharia Agrícola**, v. 33, n. 1, p. 129-144, 2013.
- LEITÃO, M. de M.V.B.R.; OLIVEIRA, G.M de; LEITÃO, T.J.V. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evaporação para duas regiões da Paraíba, **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 6, p. 585-593, 2007.
- LEIVAS, J.; FONTANA, D.; BERLATO, M.; CARDOSO, L. **Variação diária do albedo sobre uma superfície vegetada e sobre um lago na estação experimental da UFRGS-RS**. XV Congresso Brasileiro de Agrometeorologia. Aracaju, SE, 2007.

- LENTERS, J. D.; KRATZ, T. K.; BOWSER, C. J. Effects of climate variability on lake evaporation: Results from a long-term energy budget study of Sparkling Lake, northern Wisconsin (USA). **Journal of Hydrology**, v. 308, n. 1, p. 168-195, 2005.
- LINACRE, E.T. A simple formula for estimating evaporation rates in various climates using temperature data alone. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 8, p. 409-424, 1977.
- LINACRE, E.T. Data-sparse estimation of lake evaporation using a simplified Penman equation. Elsevier Science Publishers B.V. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 64, p. 237-256, 1993.
- LIU, J.; ZHAO, D.; GERBENS-LEENES, P. W.; GUAN, D. China's rising hydropower demand challenges water sector. **Scientific Reports**, Science, v. 5, 2015
- LOPES, H. L.; MONTENEGRO, S.; SOBRA, M. C.; ACCIOLY, L. J. O.; CANDEIAS, A. L. B. **Espacialização de parâmetros biofísicos em parte do reservatório de Sobradinho**. In: XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Campo Grande, MS, 2009.
- LOUZADA, A. F. Conflitos por múltiplos usos da água no reservatório da UHE de Tucuruí. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Pará, Belém, PA, 177 p., 2009.
- MEKONNEN, M. M.; GERBENS-LEENES, P. W.; HOEKSTRA, A. Y. The consumptive water footprint of electricity and heat: a global assessment. **Environmental Science: Water Research & Technology**, v. 1, n. 3, p. 285-297, 2015.
- MEKONNEN, M. M.; HOEKSTRA, A. Y. **The water footprint of electricity from hydropower**. Value of Water Research Report Series No. 51, UNESCO-IHE, Delft, the Netherlands, 2011(a).
- MEKONNEN, M. M.; HOEKSTRA, A. Y. **National water footprint accounts: the green, blue and grey water footprint of production and consumption**. Value of Water Research Report Series No. 50, UNESCO-IHE, Delft, the Netherlands, 2011(b).
- MEKONNEN, M. M.; HOEKSTRA, A. Y. The blue water footprint of electricity from hydropower. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 16, p. 179-187, 2012.
- MORTON, F.I. Operational estimates of areal evaporation and their significance to the science and practice of hydrology. **Journal of Hydrology**, v. 66, p. 1-76, 1983a.
- MORTON, F.I. Operational estimates of lake evaporation. **Journal of Hydrology**, v. 66, p. 77-100, 1983b.

- OLIVEIRA, G.M. de; LEITÃO, M de M.V.B.R; GALVÃO, C. de O.; LEITÃO, T.J.V. Estimativa da evaporação e análise do uso do coeficiente (Kp) do tanque “Classe A” nas regiões do Cariri e Sertão da Paraíba. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n. 4, p. 73-83, 2005.
- ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Séries Históricas de Vazões: Série de Vazões Naturais Médias Mensais**. 2014. Disponível em: http://www.ons.org.br/operacao/vazoes_naturais.aspx. Acesso em: 17/09/2015
- ONS – Operador Nacional do Sistema Elétrico. **Evaporações líquidas nas usinas hidrelétricas**. Rio de Janeiro: Operador Nacional do Sistema Elétrico; Diretoria de planejamento programação da operação, 61 p., 2004.
- PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. A. Updated world map of the Koppen-Geiger climate classification. **Hydrology Earth Systems Science**, v. 11, p. 1633-1644, 2007.
- PENMAN, H.L. Evaporation: an introductory survey. **Netherlands Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v.4, p.9-29, 1956.
- PENMAN, H. L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. **Proceedings of the Royal Society**, v. 193, p. 120-145, 1948.
- PEREIRA, S.B.; PRUSKI, F.F.; SILVA, D.D.; RAMOS, M.M. Evaporação líquida no lago de Sobradinho e impactos no escoamento devido à construção do reservatório. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 3, p. 346-352, 2009.
- PEREIRA, A.R.; SEDIYAMA, G.C.; NOVA, N.A.V. **Evapotranspiração**. Campinas: FUNDAG, 323 p., 2013.
- PEREIRA, A.R.; VILLA NOVA, N.A.; SEDIYAMA, G.C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FEALQ, 183 p, 1997.
- PERES, J. G. A avaliação do modelo de Penman-Monteith, padrão FAO, para estimar a evapotranspiração de referência nas condições climáticas do estado de São Paulo. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz Queiroz”, Universidade de São Paulo. Piracicaba, SP, 1994.
- PRIESTLEY, C. H. B.; TAYLOR, R. J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. **Monthly weather review**, v. 100, n. 2, p. 81-92, 1972.
- REIS, R. J.; DIAS, N. L. Multi-season lake evaporation: energy-budget estimates and CRLE model assessment with limited meteorological observations. **Journal of Hydrology**, v. 208(3), p. 135-14, 1998.

- RIMMER, A.; SAMUELS, R.; LECHINSKY, Y. A comprehensive study across methods and time scales fluxes from Lake Kinneret, Israel. **Journal of Hydrology**, v. 379, p. 181-192, 2009.
- ROQUE, R.O.; SANSIGOLO, C.A. Estimativas de evaporação do lago Taquaruçu, SP pelo método conceitual de Morton. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 6, n. 1, p. 21-28, 2001.
- ROSENBERRY, D. O.; WINTER, T. C.; BUSO, D. C.; LIKENS, G. E. Comparison of 15 evaporation methods applied to a small mountain lake in the northeastern USA. **Journal of Hydrology**, v. 340, p. 149-166, 2007.
- SANCHES, F.; FISCH, G. As possíveis alterações microclimáticas devido a formação do lago artificial da hidrelétrica de Tucuruí-PA. **Acta Amaz**, v. 35, n. 1, p. 41-50, 2005.
- SINGH, V. P.; XU, C. Y. Evaluation and generalization of 13 mass-transfer equations for determining free water evaporation. **Hydrological Processes**, v. 11, n. 3, p. 311-323, 1997.
- SIVAPRAGASAM, C.; VASUDEVAN, G.; MARAN, J.; BOSE, C., KAZA, S.; GANESH, N. Modeling evaporation-seepage losses for reservoir water balance in semi-arid regions. **Water resources management**, v. 23, n. 5, p. 853-867, 2009.
- SHIAU, S.Y.; DAVAR, K.S. Modified Penman method for potential evapotranspiration from forest regions. **Journal of Hydrology**, v. 18, p. 349-365, 1973.
- STICKLER, C. M.; COE, M. T.; COSTA, M. H.; NEPSTAD, D. C.; MCGRATH, D. G.; DIAS, L. C.; RODRIGUES, H. O.; SOARES-FILHO, B. S. Dependence of hydropower energy generation on forests in the Amazon Basin at local and regional scales. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 110, n. 23, p. 9601-9606, 2013.
- STEWART, R. B.; ROUSE, W. R. A simple method for determining the evaporation from shallow lakes and ponds. **Water Resources Research**, v. 12, n. 4, p. 623-628, 1976.
- THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. **The water balance. Publications in Climatology**. New Jersey: Drexel Institute of Technology. 104 p, 1955.
- TORCELLINI, P.A.; LONG N.; JUDKOFF, R. **Consumptive Water Use for US Power Production**. National Renewable Energy Laboratory. Washington D.C, USA (2003)
- TROVATI, L.R. **Estimativas da evaporação do lago de Ilha Solteira através do método de relação complementar**. In: VII Simpósio Brasileiro De Hidrologia e Recursos Hídricos, v. 2, p. 193-202, Salvador, BA, 1987.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. 3. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, v. 4, 2002.

VIEIRA, N. P. A. **Estimativa da evaporação nos reservatórios de Três Marias – MG e Sobradinho - BA**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 82 p., 2015.

ZHAO, D.; LIU, J. A new approach to assessing the water footprint of hydroelectric power based on allocation of water footprints among reservoir ecosystem services. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 79-82, p. 40-46, 2015.

APÊNDICES

APÊNDICE A

Tabela 1A – Evaporação mensal (mm) no reservatório de Tucuruí obtida pelos métodos de Penman, Linacre, Kohler et al., Morton e deBruin-Keijman, para o período de 1986 a 1990 e 2001 a 2014

PENMAN													
Ano\Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	TOTAL
1986	-	114,38	123,79	118,95	141,44	136,46	151,42	159,05	135,67	141,17	126,86	129,65	-
1987	138,16	129,42	114,33	134,60	154,38	-	-	137,50	111,06	136,16	117,92	118,26	-
1988	137,18	128,20	-	117,06	136,70	135,12	155,79	175,34	152,12	143,94	125,93	135,27	1542,65
1989	-	107,58	131,37	123,14	129,51	137,76	149,21	167,90	161,41	158,73	-	127,97	1394,57
1990	144,26	109,48	145,48	138,73	155,83	149,48	146,26	149,91	146,59	145,65	-	135,57	-
2000	147,19	116,62	137,67	132,77	137,77	140,82	149,82	175,71	151,84	158,70	147,22	142,00	1738,13
2001	139,18	119,83	131,14	130,83	146,14	137,14	153,83	176,54	160,67	148,73	133,50	133,30	1710,83
2002	145,71	146,60	149,70	132,00	149,17	145,72	146,66	165,56	168,62	144,48	139,02	138,98	1772,24
2003	144,95	122,25	-	136,40	143,57	141,40	163,22	170,29	166,11	135,29	-	-	-
2004	-	127,41	143,11	147,16	150,32	150,96	162,04	169,95	162,32	159,29	137,01	127,24	-
2005	147,29	124,86	139,43	137,64	141,46	156,78	172,47	182,75	173,93	-	-	129,60	-
2006	156,04	125,38	144,30	128,72	135,10	158,21	171,56	187,33	177,82	178,95	145,93	149,70	1859,05
2007	163,59	122,49	111,45	138,22	166,60	160,67	157,28	173,12	168,08	-	-	-	-
2008	164,83	179,73	163,69	167,64	178,00	185,09	218,58	-	233,85	242,78	214,00	173,37	-
2009	143,79	132,50	143,65	127,49	117,43	139,00	-	-	178,64	187,36	152,07	126,10	-
2010	144,87	130,28	165,48	-	-	-	-	184,97	173,84	176,45	160,53	144,34	-
2011	133,94	126,33	141,96	128,11	137,80	155,23	169,71	164,49	177,35	166,33	150,83	155,97	1808,09
2012	126,81	121,66	150,24	154,50	153,08	148,58	156,34	175,67	168,46	163,30	157,05	133,45	1809,12
2013	125,68	137,90	149,64	145,21	151,93	149,27	157,19	159,55	171,01	174,52	143,33	169,07	1834,29
2014	133,21	119,00	133,06	133,97	138,98	146,93	160,37	160,89	154,01	162,06	158,07	151,50	1752,04
MÉDIA	143,33	127,09	139,97	135,43	145,54	148,59	161,28	168,70	164,67	162,44	147,28	140,07	1784,40

LINACRE													
Ano\Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	TOTAL
1986	-	83,95	79,22	70,78	101,53	89,72	140,47	155,49	157,47	102,05	113,25	102,56	-
1987	121,83	84,04	75,92	86,92	101,46	-	-	155,58	156,77	185,55	154,05	119,84	-
1988	85,02	98,20	-	73,96	92,63	82,53	119,00	141,85	173,39	152,26	119,33	98,21	-
1989	-	87,38	90,06	73,97	81,32	98,28	128,38	149,13	154,97	132,65	-	104,35	-
1990	115,77	99,47	113,04	88,73	109,12	120,19	104,94	153,63	149,18	143,37	-	96,11	-
2000	97,16	72,76	85,58	88,00	95,75	111,43	118,16	160,79	132,34	163,34	165,11	120,15	1410,59
2001	76,98	96,82	80,80	69,23	91,35	97,21	125,99	189,28	148,55	149,73	131,31	107,30	1364,54
2002	100,04	102,22	102,92	88,26	101,86	102,80	122,69	155,44	148,01	196,27	131,98	105,42	1457,90
2003	119,18	69,95	-	88,10	103,78	113,46	157,73	137,31	156,10	183,76	-	-	-
2004	-	94,43	97,36	98,18	119,37	114,17	130,36	161,15	153,18	200,77	151,35	137,41	1457,71
2005	116,43	83,18	96,77	93,21	89,45	138,52	135,79	157,87	193,06	-	-	105,71	-
2006	103,99	86,74	84,47	65,78	86,91	111,45	147,26	164,30	151,59	181,64	117,39	138,43	1439,97

Continua...

Tabela 1A - Cont.

2007	136,15	77,89	95,22	92,05	109,70	126,25	116,43	173,58	207,10	-	-	-	-
2008	99,23	95,95	81,98	89,91	96,53	114,86	157,78	-	168,81	150,77	142,45	105,50	-
2009	99,15	96,51	83,33	67,51	81,12	97,46	-	-	199,41	190,50	175,57	102,80	-
2010	90,45	94,15	118,37	-	-	-	-	182,44	198,52	149,52	128,85	111,28	-
2011	89,04	95,24	101,71	76,67	82,06	108,96	124,94	166,43	159,32	141,25	130,07	171,34	1447,05
2012	90,33	89,19	85,91	104,94	133,87	120,97	119,09	197,07	210,43	148,66	157,14	101,40	1559,00
2013	89,77	86,62	106,59	89,65	101,83	108,85	115,27	157,59	164,39	148,22	124,72	151,39	1444,89
2014	89,11	82,13	95,84	74,23	92,76	114,74	136,70	144,63	196,61	133,74	158,66	117,01	1436,15
MÉDIA	101,15	88,84	93,06	83,16	98,55	109,55	129,47	161,31	168,96	158,56	140,08	116,46	1449,15

KOHLER et al.

Ano\Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	TOTAL
1986	-	82,00	88,74	85,06	101,94	99,26	109,18	114,53	98,71	102,43	91,27	93,67	-
1987	100,04	93,16	82,47	96,89	111,14	-	-	99,91	81,48	99,66	87,32	87,30	-
1988	99,17	92,64	-	84,14	98,54	98,34	113,84	127,80	110,71	105,38	91,83	97,83	-
1989	-	77,91	94,65	88,90	93,58	99,70	108,42	121,68	117,07	115,01	-	92,71	-
1990	104,27	79,35	105,00	99,79	112,29	108,22	105,42	108,17	105,85	105,45	-	97,67	-
2000	106,51	84,27	99,33	95,85	99,93	102,22	108,96	127,06	110,05	114,86	107,35	103,40	1259,78
2001	100,77	86,65	94,77	94,44	105,55	99,60	112,08	128,59	117,05	109,08	98,29	97,40	1244,28
2002	105,88	106,09	108,69	96,09	108,50	105,93	106,67	120,18	122,37	105,65	102,08	102,07	1290,20
2003	105,52	88,89	-	99,38	104,90	103,38	119,57	124,16	121,05	99,75	-	-	-
2004	-	92,98	104,49	107,55	110,25	110,93	118,96	124,37	118,73	117,21	101,35	94,33	1201,13
2005	108,02	91,31	102,06	100,60	103,93	115,26	126,86	133,86	127,17	-	-	95,51	-
2006	114,18	91,89	105,33	94,41	99,16	116,38	126,25	137,12	129,96	131,09	107,44	110,11	1363,33
2007	119,84	89,58	82,45	101,24	121,77	118,02	115,33	126,97	123,29	-	-	-	-
2008	101,71	99,44	102,40	98,87	105,72	107,14	126,52	-	125,12	132,09	114,59	101,31	-
2009	105,53	97,02	105,02	93,59	86,50	102,44	-	-	130,87	137,59	112,46	93,96	-
2010	106,52	95,73	121,09	-	-	-	-	136,19	127,77	129,58	117,96	106,07	-
2011	98,25	92,29	103,62	93,33	101,10	114,06	124,85	121,03	130,16	122,38	110,73	114,95	1326,77
2012	93,26	89,07	109,12	112,53	112,44	109,35	115,12	129,49	124,05	120,38	116,03	98,71	1329,56
2013	92,68	101,04	109,60	106,18	111,66	109,89	115,65	117,15	125,37	128,32	105,72	124,26	1347,51
2014	98,28	86,88	97,20	97,53	101,93	108,20	117,94	118,36	113,59	119,39	116,42	111,71	1287,43
MÉDIA	103,55	90,91	100,89	97,18	104,78	107,13	115,98	123,14	118,02	116,40	105,39	101,28	1284,65

MORTON

Ano\Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	TOTAL
1986	-	69,31	56,63	70,66	78,29	81,53	88,29	93,25	81,11	79,76	74,35	72,75	-
1987	79,59	83,71	46,58	80,57	89,82	-	-	72,57	52,93	74,64	59,53	56,37	-
1988	79,93	82,44	-	67,48	74,24	80,00	96,71	113,68	96,35	77,32	72,15	78,87	-
1989	-	60,47	65,04	76,99	69,98	81,72	88,99	104,71	104,09	90,82	-	71,55	-
1990	81,29	62,04	70,90	81,36	91,47	90,93	83,88	86,62	88,22	80,97	-	79,90	-

Continua...

Tabela 1A - Cont.

2000	80,79	69,33	67,98	79,50	74,18	80,71	84,55	104,36	91,10	84,15	79,82	76,67	973,14
2001	79,10	73,86	60,90	79,56	80,15	79,64	90,54	109,52	101,64	77,80	71,73	73,92	978,37
2002	78,80	91,71	69,15	77,25	85,51	84,92	83,26	98,18	108,08	74,41	74,28	73,66	999,20
2003	111,48	99,12	-	113,11	119,80	125,71	140,53	147,98	151,99	90,79	-	-	-
2004	-	106,53	93,92	129,52	128,54	134,13	122,71	144,11	147,03	122,93	99,42	84,13	-
2005	112,78	102,58	89,21	115,82	119,60	139,26	143,97	154,34	155,88	-	-	91,81	-
2006	128,34	104,12	95,53	106,72	112,30	138,58	144,47	157,70	162,15	148,82	116,90	117,01	1532,63
2007	134,56	98,25	54,24	117,26	147,14	141,00	135,00	146,98	151,72	-	-	-	-
2008	88,11	97,00	55,39	95,55	100,06	110,42	124,11	-	132,52	151,50	131,99	104,40	-
2009	113,18	115,03	94,56	103,85	87,80	126,13	-	-	165,49	158,27	122,99	86,27	-
2010	119,95	115,37	131,58	-	-	-	-	165,28	166,20	156,47	146,84	112,77	-
2011	102,32	108,61	95,70	107,22	117,33	138,48	144,05	140,85	163,98	135,35	127,98	127,80	1509,67
2012	77,77	102,92	106,20	140,91	134,94	133,03	134,65	149,44	152,86	130,01	133,43	99,35	1495,52
2013	88,74	125,06	103,05	127,08	134,31	134,39	135,75	138,69	159,09	146,56	118,68	144,20	1555,61
2014	101,69	97,80	85,05	115,32	119,22	132,89	137,34	138,98	139,20	134,30	138,73	124,83	1465,34
MÉDIA	97,55	93,26	80,09	99,25	103,40	112,97	116,40	125,96	128,58	111,94	104,59	93,12	1267,12

DEBRUIN-KEIJMAN

Ano\Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	TOTAL
1986	-	139,79	151,52	146,10	170,09	161,40	181,78	190,26	157,23	168,02	153,41	155,35	-
1987	164,58	156,11	138,75	162,07	186,26	-	-	160,53	127,30	156,42	133,23	135,17	-
1988	164,33	153,50	-	142,36	165,22	159,67	182,04	203,65	177,42	165,92	148,32	162,72	-
1989	-	130,19	159,56	148,92	155,95	165,10	177,27	198,65	187,85	189,09	-	153,48	-
1990	173,18	131,49	174,70	168,35	187,75	178,11	176,23	179,77	175,17	172,88	-	164,14	-
2000	174,57	138,77	164,29	158,24	162,65	163,43	172,53	201,51	175,85	183,50	166,68	163,28	2025,28
2001	164,11	143,21	156,27	156,49	173,99	161,51	177,27	195,34	180,82	166,70	145,66	153,70	1975,08
2002	169,49	170,89	173,83	154,48	173,89	167,83	169,56	187,69	190,53	159,34	152,94	156,42	2026,89
2003	167,44	142,98	-	156,97	163,98	160,52	180,01	189,33	186,38	144,94	-	-	-
2004	-	145,90	163,60	167,56	167,63	167,39	176,66	184,21	176,32	167,94	141,64	136,23	-
2005	163,24	143,68	159,43	157,28	159,59	172,43	184,69	197,11	182,76	-	-	144,20	-
2006	176,71	143,30	165,08	148,87	153,60	171,75	184,32	200,49	191,47	191,82	158,34	164,13	2049,89
2007	182,28	139,01	125,39	157,80	187,51	175,37	172,83	187,07	177,00	-	-	-	-
2008	158,39	155,56	162,55	155,75	163,64	159,92	182,35	-	184,85	195,80	168,94	155,22	-
2009	164,05	151,87	164,30	146,48	133,82	156,65	-	-	193,77	199,94	159,89	138,28	-
2010	164,40	147,82	187,51	-	-	-	-	199,37	185,48	191,91	178,78	163,18	-
2011	154,72	147,09	165,81	151,81	159,93	173,10	187,80	177,86	194,14	179,68	169,54	171,80	2033,28
2012	145,76	141,98	177,32	179,62	172,43	166,17	173,46	189,91	178,28	173,23	169,74	150,21	2018,11
2013	144,11	159,94	172,12	167,38	173,66	166,83	175,61	176,33	188,85	189,76	160,63	186,20	2061,43
2014	152,49	139,51	155,85	158,13	160,82	165,41	178,59	179,04	167,05	179,69	175,72	169,71	1982,01
MÉDIA	163,76	146,13	162,10	157,09	166,97	166,26	178,41	188,78	178,93	176,48	158,90	156,86	2000,66

Tabela 2A – Evaporação mensal (mm) no reservatório de Lajeado obtida pelos métodos de Penman, Linacre, Kohler et al., Morton e deBruin-Keijman, para o período de 2002 a 2014

PENMAN													
Ano\Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	TOTAL
2002	139,78	-	143,06	150,73	151,93	151,98	159,93	209,47	171,44	179,72	184,35	144,01	-
2003	153,94	139,05	138,14	157,17	144,83	151,27	175,80	173,58	197,00	164,84	149,55	159,51	1904,68
2004	133,94	120,07	134,08	142,56	167,21	150,73	165,85	184,89	207,39	161,26	159,30	149,21	1876,50
2005	144,45	140,32	135,74	148,17	144,96	153,58	173,26	201,37	207,87	183,51	154,52	137,68	1925,45
2006	170,22	129,73	140,45	112,17	127,44	154,47	160,66	195,48	183,53	162,55	156,09	155,17	1847,98
2007	155,42	110,46	161,79	134,51	151,43	159,75	162,21	207,50	212,08	188,19	155,68	153,75	1952,76
2008	140,61	121,85	131,37	132,03	137,63	145,19	159,94	185,01	201,56	201,39	141,15	141,87	1839,60
2009	160,93	126,88	134,81	120,52	117,22	133,64	155,84	177,93	171,27	144,40	154,04	149,74	1747,23
2010	154,86	143,07	152,53	157,96	142,09	155,68	178,81	193,00	220,18	170,23	153,33	-	-
2011	125,37	115,74	135,45	137,54	145,77	145,37	165,58	186,76	204,93	162,32	125,47	153,52	1803,81
2012	122,36	126,82	137,03	150,41	145,97	139,43	162,51	201,05	197,00	189,41	140,66	161,92	1874,58
2013	138,65	137,12	140,75	138,32	148,97	141,11	167,26	183,61	192,92	177,94	148,49	129,25	1844,38
2014	141,79	112,91	136,11	142,97	150,48	164,69	188,23	217,50	202,89	198,56	161,02	153,34	1970,48
MÉDIA	144,79	127,00	140,10	140,39	144,30	149,76	167,38	193,63	197,70	175,72	152,59	149,08	1882,44

LINACRE													
Ano\Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	TOTAL
2002	97,50	-	112,81	122,77	128,23	169,31	179,76	239,51	159,30	141,33	127,38	122,21	-
2003	97,93	109,66	111,66	102,67	111,04	164,12	194,75	179,05	198,39	136,22	108,93	129,20	1643,61
2004	94,40	110,30	105,97	97,98	176,38	140,12	183,58	216,07	200,70	133,22	128,44	118,17	1705,33
2005	115,45	105,83	105,59	107,93	130,69	162,54	186,58	223,55	175,92	149,34	116,70	105,35	1685,47
2006	134,22	96,73	92,88	77,49	97,38	163,12	177,48	220,03	130,35	136,24	134,69	121,41	1582,04
2007	104,51	75,14	118,09	121,72	133,12	173,73	181,96	240,76	197,49	159,81	120,72	136,85	1763,90
2008	106,87	98,40	99,97	94,06	127,66	156,89	174,94	210,04	212,48	166,31	105,92	126,38	1679,92
2009	130,38	90,74	118,50	108,26	77,30	114,38	168,57	200,92	146,23	117,68	124,05	107,91	1504,92
2010	95,87	111,02	89,34	128,39	137,65	166,45	198,62	220,83	230,29	126,82	122,32	-	-
2011	101,98	91,88	96,25	99,17	149,81	156,87	178,67	207,63	241,51	123,50	114,65	109,73	1671,65
2012	98,95	101,20	129,58	122,74	121,46	143,62	180,82	232,53	240,84	189,71	107,03	120,82	1789,30
2013	112,26	109,95	96,52	119,35	139,07	127,42	181,10	206,01	207,24	158,03	111,18	94,29	1662,42
2014	110,17	97,75	98,46	109,01	129,32	179,83	210,15	251,49	176,97	164,43	129,93	119,03	1776,53
MÉDIA	107,73	99,88	105,82	108,58	127,63	155,26	184,38	219,11	193,67	146,36	119,38	117,61	1685,41

KOHLER et al.													
Ano\Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	TOTAL
2002	101,94	-	105,01	111,01	112,78	112,85	119,69	150,40	126,80	132,07	134,64	105,49	-
2003	112,53	101,92	101,13	115,20	107,06	112,57	128,39	128,37	144,24	121,26	109,77	116,72	1399,16
2004	97,99	87,91	98,47	104,99	123,23	111,70	122,87	135,77	150,52	119,31	117,25	110,31	1380,32

Continua...

Tabela 2A - Cont.

2005	106,33	103,09	100,01	109,36	107,98	114,27	127,70	147,19	151,40	136,10	114,24	101,64	1419,30
2006	125,22	95,44	103,35	83,09	95,00	114,67	119,85	142,77	135,64	120,26	115,16	114,45	1364,91
2007	114,24	81,06	119,84	100,00	113,72	118,10	121,53	149,36	153,22	140,25	115,72	114,16	1441,19
2008	104,13	89,89	96,83	97,87	103,82	109,70	120,46	137,81	148,26	148,55	105,14	104,72	1367,19
2009	118,80	93,49	99,76	89,43	88,13	101,04	117,90	133,24	128,33	107,18	114,14	110,70	1302,15
2010	114,15	105,92	112,05	117,37	107,40	116,23	130,90	142,48	159,05	125,95	113,19	-	-
2011	92,48	85,12	99,50	101,60	109,73	109,97	123,24	139,40	150,85	120,42	93,19	113,14	1338,63
2012	90,10	94,01	100,90	110,99	109,20	104,90	121,66	145,71	144,99	140,69	104,01	119,45	1386,61
2013	101,92	100,97	103,58	102,37	111,00	106,76	124,92	137,04	142,79	130,81	109,52	95,52	1367,19
2014	104,11	83,12	100,33	104,83	111,66	119,67	134,85	153,71	146,48	143,17	117,86	113,08	1432,85
MÉDIA	106,46	93,49	103,13	103,70	107,75	111,73	124,15	141,79	144,81	129,69	112,60	109,95	1389,25

MORTON

Ano\Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	TOTAL
2002	80,91	-	68,92	98,56	98,56	106,07	114,02	145,97	121,47	114,62	124,75	78,02	-
2003	139,99	142,47	125,67	155,92	132,80	135,33	141,03	147,22	173,42	150,46	145,27	149,74	1739,32
2004	110,51	111,55	116,21	143,59	152,24	132,73	140,23	152,31	175,00	152,87	157,95	138,44	1683,64
2005	130,47	147,75	124,62	149,88	134,83	141,89	145,38	169,60	180,59	174,15	153,90	121,83	1774,89
2006	142,79	115,65	100,38	92,55	110,02	125,12	124,85	147,89	158,69	136,59	137,61	129,85	1521,99
2007	148,54	97,93	157,44	139,74	145,98	140,19	141,06	164,67	177,97	178,67	155,44	149,44	1797,06
2008	132,80	122,55	122,68	136,48	135,78	137,01	141,98	162,34	180,36	185,79	138,11	130,86	1726,74
2009	160,06	131,70	126,14	119,03	117,66	132,47	143,09	160,11	164,27	136,17	157,03	142,28	1690,01
2010	151,27	155,65	148,48	160,96	141,28	143,03	148,23	165,23	186,86	163,76	154,35	-	-
2011	88,17	96,12	93,98	125,83	126,46	124,63	129,18	153,12	174,57	133,73	96,39	129,53	1471,71
2012	97,92	133,67	126,91	153,39	139,58	132,07	141,48	161,75	171,56	177,58	129,49	158,91	1724,30
2013	120,39	147,34	131,54	141,27	144,44	139,21	149,94	164,25	177,49	161,68	144,10	110,22	1731,88
2014	128,80	103,51	122,03	142,70	142,91	139,93	145,66	163,90	173,50	168,55	155,68	144,31	1731,49
MÉDIA	125,58	125,49	120,38	135,38	132,50	133,05	138,93	158,33	170,44	156,51	142,31	131,95	1670,88

DEBRUIN-KEIJMAN

Ano\Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	TOTAL
2002	160,94	-	163,78	165,22	161,18	141,52	149,83	173,72	164,50	194,10	202,45	159,40	-
2003	172,42	154,97	158,45	174,76	151,57	145,33	152,37	160,42	188,28	173,51	167,67	177,59	1977,33
2004	151,60	136,79	151,34	160,29	172,34	141,35	152,32	163,63	186,52	176,86	177,89	168,02	1938,95
2005	165,64	159,12	157,39	165,69	153,24	152,95	157,89	178,84	195,19	197,40	173,14	157,51	2014,01
2006	188,73	149,51	162,95	130,71	142,45	151,10	151,63	172,24	183,74	180,63	176,05	176,17	1965,91
2007	178,67	128,71	182,48	154,73	164,78	146,90	149,78	171,28	189,76	200,13	175,34	175,45	2018,01
2008	165,85	143,06	155,32	153,19	154,65	146,18	152,96	170,78	191,62	204,56	160,92	164,82	1963,89
2009	186,79	149,23	158,81	141,66	135,95	144,83	156,44	172,19	181,90	165,42	176,72	171,96	1941,90
2010	180,55	164,84	177,93	175,75	155,52	149,49	156,11	170,99	193,27	184,66	174,50	-	-
2011	145,45	137,10	159,01	156,71	159,98	147,56	154,55	176,40	186,07	176,53	145,18	176,63	1921,19

Continua...

Tabela 2A - Cont.

2012	142,28	148,02	159,73	170,63	158,54	141,18	151,19	169,70	180,51	195,95	156,30	185,09	1959,12
2013	158,21	160,22	163,09	156,46	163,47	148,23	160,19	173,05	189,19	180,88	167,07	150,38	1970,44
2014	164,02	132,46	155,08	158,47	161,05	148,90	156,03	173,48	189,29	189,02	174,79	172,64	1975,25
MÉDIA	166,24	147,00	161,95	158,79	156,52	146,58	153,94	171,29	186,14	186,13	171,39	169,64	1975,61

APÊNDICE B

Tabela 1B – Balanço Hídrico de Thornthwaite & Mather (1955) para o reservatório de Tucuruí no período de 1976 a 1984

Tempo	ETP	P-ETP	NEG-AC	ARM	ALT	ETR	DEF	EXC	Prova
Meses	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	Real
Jan	101,9	228,3	0,0	100,0	25,8	101,9	0,0	202,5	ETP=ETR+DEF
Fev	98,0	344,1	0,0	100,0	0,0	98,0	0,0	344,1	1502,4
Mar	108,0	277,6	0,0	100,0	0,0	108,0	0,0	277,6	
Abr	108,6	248,7	0,0	100,0	0,0	108,6	0,0	248,7	P=ETR+EXC
Mai	112,5	95,1	0,0	100,0	0,0	112,5	0,0	95,1	1330,6
Jun	117,5	-62,7	-62,7	53,4	-46,6	101,4	16,1	0,0	
Jul	117,8	-75,0	-137,8	25,2	-28,2	71,0	46,8	0,0	P=ETP+(P-ETP)
Ago	119,0	-92,9	-230,3	10,0	-15,2	41,3	77,7	0,0	2196,6
Set	116,5	-89,3	-319,4	4,1	-5,9	33,1	83,4	0,0	
Out	121,0	-57,0	-377,2	2,3	-1,8	65,8	55,2	0,0	Σ ALT
Nov	102,8	-23,3	-401,7	1,8	-0,5	80,0	22,8	0,0	0,0
Dez	107,0	72,4	0,0	74,2	72,4	107,0	0,0	0,0	
Média	110,9	72,2	-127,4	-	-	85,7	25,2	97,3	P-ETP=EXC-DEF
Total/Ano	1330,6	866,0	-1529,1	-	-	1028,6	302,0	1168,0	866,0

Tabela 2B – Balanço Hídrico de Thornthwaite & Mather (1955) para o reservatório de Lajeado no período de 1994 a 2001

Tempo	ETP	P-ETP	NEG-AC	ARM	ALT	ETR	DEF	EXC	Prova
Meses	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm	Real
Jan	119,7	79,4	0,0	100,0	0,0	119,7	0,0	79,4	ETP=ETR+DEF
Fev	108,1	133,7	0,0	100,0	0,0	108,1	0,0	133,7	1502,4
Mar	115,8	141,2	0,0	100,0	0,0	115,8	0,0	141,2	
Abr	116,6	34,7	0,0	100,0	0,0	116,6	0,0	34,7	P=ETR+EXC
Mai	124,6	-65,0	-65,0	52,2	-47,8	107,4	17,2	0,0	1612,5
Jun	118,2	-105,0	-169,8	18,3	-33,9	47,1	71,1	0,0	
Jul	129,6	-121,1	-291,9	5,4	-12,9	21,4	108,2	0,0	P=ETP+(P-ETP)
Ago	153,3	-146,7	-434,3	1,3	-4,1	10,7	142,6	0,0	1612,5
Set	142,1	-113,3	-552,1	0,4	-0,9	29,7	112,4	0,0	
Out	133,0	3,6	0,0	4,0	3,6	133,0	0,0	0,0	Σ ALT
Nov	121,3	105,7	0,0	100,0	96,0	121,3	0,0	9,7	0,0
Dez	120,1	162,9	0,0	100,0	0,0	120,1	0,0	162,9	
Média	125,2	9,2	-126,1	-	-	87,6	37,6	46,8	P-ETP=EXC-DEF
Total/Ano	1502,4	110,1	-1513,1	-	-	1050,9	451,5	561,6	110,1