



EDUARDO DE OLIVEIRA BUENO

**EVAPORAÇÃO DO RESERVATÓRIO DA
USINA HIDRELÉTRICA DE CAMARGOS:
CARACTERIZAÇÃO DA PEGADA HÍDRICA**

LAVRAS – MG

2014

EDUARDO DE OLIVEIRA BUENO

**EVAPORAÇÃO DO RESERVATÓRIO DA USINA HIDRELÉTRICA DE
CAMARGOS: CARACTERIZAÇÃO DA PEGADA HÍDRICA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas, para obtenção do título de Mestre.

Orientador

Dr. Carlos Rogério de Mello

LAVRAS – MG

2014

**Ficha Catalográfica Elaborada pela Coordenadoria de Produtos e
Serviços da Biblioteca Universitária da UFLA**

Bueno, Eduardo de Oliveira.

Evaporação do reservatório da Usina Hidrelétrica de Camargos :
caracterização da pegada hídrica / Eduardo de Oliveira Bueno. –
Lavras : UFLA, 2014.

127 p. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2014.

Orientador: Carlos Rogério de Mello.

Bibliografia.

1. Evaporação. 2. Reservatório. 3. Hidrelétrica. 4. Pegada
hídrica. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 628.132

EDUARDO DE OLIVEIRA BUENO

**EVAPORAÇÃO DO RESERVATÓRIO DA USINA HIDRELÉTRICA DE
CAMARGOS: CARACTERIZAÇÃO DA PEGADA HÍDRICA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas, para obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 15 de Agosto de 2014

Dr. Samuel Beskow	UFPEL
Dr. Marcelo Ribeiro Viola	UFLA
Dra. Silvia de Nazaré Monteiro Yanagi	UFLA

Dr. Carlos Rogério de Mello
Orientador

**LAVRAS – MG
2014**

Ao meu pai, "Zé Camilo" (in memoriam).

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, agradeço a Deus pela graça da vida, saúde e sabedoria para desenvolver esta pesquisa.

À minha esposa Fabiana, pelo seu amor, confiança, compreensão das minhas ausências e dedicação ao nosso filho e ao nosso lar.

Ao meu filho Rafael, pelos abraços, beijos e sorrisos quando do meu retorno das dezenas de viagens para Lavras.

Ao meu orientador, professor Carlos Rogério, pela confiança, ensinamentos, dedicação e coordenação do projeto de pesquisa.

Aos professores e colegas do Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas da Universidade Federal de Lavras - UFLA, pela atenção ao longo das disciplinas cursadas.

Ao professor Luiz Gonsaga pela atenção, ensinamentos e fornecimento dos dados da estação climatológica do INMET / UFLA.

À professora Sílvia Yanagi pela atenção, bibliografia fornecida e esclarecimentos sobre os dados da estação meteorológica "Marcela".

Ao colega Geovane Alves pela coleta e repasse dos dados da estação meteorológica "Marcela".

Aos colegas Marcelo de Deus e Renato Constâncio, em nome da Gerência de Planejamento Energético da Companhia Energética de Minas Gerais - CEMIG, pela atenção de sempre e fornecimento das informações do reservatório da UHE de Camargos, indispensáveis para esta pesquisa.

Ao CNPq (Processo 477147/2012-7) e à FAPEMIG (PPM 00071/2014) pelo apoio financeiro para o desenvolvimento do projeto.

Por fim, agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de mestrado concedida.

RESUMO

Nos últimos anos, um debate importante tem ocorrido provocado pelo questionamento se as hidrelétricas são de fato de uso não consuntivo dos recursos hídricos. Neste contexto, foi desenvolvido um estudo no reservatório da Usina Hidrelétrica (UHE) de Camargos, localizado na região do Alto Rio Grande, sul de Minas Gerais, com base em dados monitorados por uma estação meteorológica instalada nas proximidades, com o objetivo de estimar as taxas de evaporação e caracterizar a Pegada Hídrica desta usina. As taxas de evaporação foram estimadas pelos métodos do Tanque Classe A, Linacre, Penman, Penman-Monteith e ONS (Programa SisEvapo v2.0). Para todas estas metodologias foram obtidos valores de evaporação média diária próximos, da ordem de 3,8 mm/dia, com variação máxima de 0,4 mm/dia. Em relação à distribuição da evaporação, todos os métodos apresentaram o mesmo padrão sazonal, com as taxas mínimas estimadas para os meses de Junho e Julho (quando foram observados valores menores de temperatura do ar e radiação solar), e as taxas máximas de evaporação obtidas para os meses de Fevereiro e Setembro (caracterizados por maiores temperatura do ar e radiação solar). O comparativo das evaporações mensais, obtidas pelos métodos de Penman e Penman-Monteith, indicou que desprezar o efeito de variação de armazenamento de calor no corpo d'água resulta, na escala mensal, em diferenças de até 30%. A maioria dos métodos apresentou valores de evaporações mensais menores do que o indicado pelo ONS. Pelos resultados obtidos, ficou evidente que a UHE de Camargos é um grande consumidor de água, sobretudo, quando comparado com outros usos dos recursos hídricos. A evaporação média anual obtida pelos métodos estudados (1298 mm/ano) equivale a um consumo médio de 2,6 m³/s de água. No entanto, considerando a vazão regularizada pela UHE de Camargos (93,5 m³/s) este valor torna-se insignificante. Apesar de uma taxa de evaporação anual mediana e da pequena área do reservatório, por se tratar de um aproveitamento antigo (mais de 50 anos) o seu rendimento é muito baixo, resultando, para todos os métodos, em uma Pegada Hídrica Real elevada (126 m³/GJ em média). Os resultados deste estudo ressaltaram o melhor desempenho das metodologias que consideram a variação de calor armazenado no reservatório e, portanto, reforçaram a importância do monitoramento da temperatura da água para um balanço de energia confiável. Quanto à Pegada Hídrica, este indicador mostrou-se capaz de identificar o impacto do rendimento real das usinas hidrelétricas na eficiência do uso dos recursos hídricos para geração de energia elétrica.

Palavras-chave: Evaporação. Reservatório. Hidrelétrica. Pegada Hídrica.

ABSTRACT

In recent years an important debate has been provoked by a question related to if the hydropower plants reservoirs are indeed a non-consumptive use of water resources. In this context, this work was developed on the Camargos Hydropower Plant reservoir, located in the Upper Rio Grande (URG), southern Minas Gerais, using weather data sets from a weather station installed nearby, with the objective of estimating evaporation rates, allowing the characterization of the Water Footprint in this facility. The evaporation rates were estimated by Class A pan, Linacre, Penman, Penman-Monteith and ONS (SisEvapo Program v2.0) methods. For all these methods, the mean daily results of evaporation were close, approximately 3.8 mm / day with a maximum variation of 0.4 mm / day. Regarding the distribution of evaporation, all methods showed the same seasonal pattern, with the minimum rates estimated for the months of June and July (when minor air temperature and solar radiation values were observed), and the maximum evaporation rates were obtained for the months of February and September (characterized by higher air temperature and solar radiation). The comparison of monthly evaporation obtained by Penman and Penman-Monteith methods indicated that they neglect the effect of change of heat storage in the water body in monthly scale, which differences were up to 30%. Most methods showed values lower than indicated by the ONS monthly evaporation. From the results obtained, it was evident that Camargos Hydropower Plant is one of the greatest water consumption of the URG region, especially when compared with other uses of water resources. The average annual evaporation obtained by the methods studied (1298 mm / year) equates an average consumption of 2.6 m³/s. However, considering the flow regulated by the reservoir (93.5 m³/s) this value becomes insignificant. Despite of a medium annual rate of evaporation and the small area of the reservoir, as the hydropower plant is old (over 50 years), its income is very low, resulting, for all methods, in a high Real Footprint (126 m³/GJ on average). The results of this study highlighted the better performance of the methodologies that consider the variation of heat stored in the reservoir and thus reinforced the importance of water temperature monitoring to a reliable balance of power. Regarding Water Footprint, this indicator was capable of identifying the impact of the real income of the hydroelectric plant in the efficient use of water resources for power generation.

Keywords: Evaporation. Reservoir. Hydroelectric. Water Footprint.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
2 REFERENCIAL TEÓRICO	13
2.1 Pegada Hídrica	13
2.1.1 Pegada Hídrica de Usinas Hidrelétricas.....	14
2.2 Evaporação de Lagos e Reservatórios	17
2.2.1 Fatores que influenciam o processo de evaporação.....	18
2.2.1.1 Umidade Relativa do Ar	18
2.2.1.2 Temperatura do Ar	19
2.2.1.3 Velocidade do Vento	20
2.2.1.4 Radiação Solar.....	20
2.2.2 Métodos de estimativa do processo de evaporação	20
2.2.2.1 Medidas Diretas.....	26
2.2.2.1.1 Evaporímetro de Piche.....	26
2.2.2.1.2 Tanque Classe A.....	28
2.2.2.1.3 Sensores de medição de Vórtices Turbulentos	31
2.2.2.2 Balanço Hídrico.....	33
2.2.2.3 Métodos Empíricos.....	34
2.2.2.3.1 Modelo CRLE (MORTON, 1983).....	36
2.2.2.4 Métodos de Transferência de Massa (Aerodinâmico)	40
2.2.2.5 Métodos de Balanço de Energia.....	42
2.2.2.6 Métodos Combinados	43
2.2.2.6.1 Método de Penman (PENMAN, 1948)	44
2.2.2.6.2 Método de Penman-Monteith (MONTEITH, 1965).....	49
2.2.2.7 O coeficiente Albedo de corpos d'água.....	51
3 MATERIAL E MÉTODOS	53
3.1 Caracterização da Área de Estudo: Usina Hidrelétrica de Camargos.....	53

3.2 Dados de Geração da UHE de Camargos	55
3.3 Dados Climatológicos	57
3.3.1 Estação Climatológica Principal de Lavras.....	58
3.3.2 Estação Meteorológica Marcela.....	61
3.4 Dados de Evaporação do ONS.....	67
3.5 Metodologias de Estimativa da Evaporação	70
3.5.1 Método de Linacre (LINACRE, 1977).....	71
3.5.2 Método de Penman (PENMAN, 1948).....	72
3.5.3 Método de Penman-Monteith (MCJANNET et al., 2008).....	76
3.6 Método de cálculo da Pegada Hídrica (MEKONNEN; HOEKSTRA, 2011)	82
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	84
4.1 Evaporação Média Diária	84
4.2 Evaporação Mensal	88
4.2.1 Método do Tanque Classe A.....	88
4.2.2 Método de Linacre.....	91
4.2.3 Método de Penman.....	93
4.2.4 Método de Penman-Monteith.....	96
4.2.5 Evaporação do ONS	98
4.3 Evaporação Média Anual	100
4.4 Considerações sobre os métodos de Penman e Penman-Monteith.....	102
4.5 Comparativo dos métodos de estimativa de evaporação	106
4.6 Desvios dos métodos em relação à evaporação adotada pelo ONS	109
4.7 Caracterização da Pegada Hídrica da UHE de Camargos	114
5 CONCLUSÕES	118
REFERÊNCIAS.....	121

1 INTRODUÇÃO

Entre as diversas fontes de geração de energia elétrica utilizadas no Brasil, a hidroeletricidade representa 63% da matriz energética nacional (BRASIL, 2014). A bacia hidrográfica do rio Grande, onde está localizada a Usina Hidrelétrica (UHE) de Camargos, tem grande importância no contexto da geração hidrelétrica brasileira, representando, aproximadamente, 11,7% da potência nacional instalada, com uma capacidade de 7722 MW (BRASIL, 2007b).

No contexto dos impactos negativos, gerados pela construção de reservatórios para usinas hidrelétricas, nos últimos anos, um debate importante tem ocorrido provocado pelo seguinte questionamento: o uso dos recursos hídricos pelas usinas hidrelétricas é de fato não consuntivo? (MEKONNEN; HOEKSTRA, 2011).

Esta questão surge em razão do conceito elaborado, recentemente, sobre Pegada Hídrica (Water Footprint), que consiste no consumo de água necessário para produzir uma unidade de determinado produto, considerando todas as fases de sua cadeia produtiva (HOEKSTRA et al., 2011).

Para a geração hidrelétrica, a situação é mais específica e busca-se quantificar a Pegada Hídrica em termos da relação entre a evaporação dos reservatórios e a energia produzida (geralmente expressa em m^3/GJ). Isto significa que, para a geração de energia elétrica via matriz hidráulica, é fundamental considerar quanto se perde, anualmente, de água para a atmosfera para uma determinada produção anual de energia elétrica.

Existem dados preocupantes no tocante à perda de água por evaporação e esta preocupação é maior nas regiões tropicais e subtropicais. Por exemplo, Mekonnen e Hoekstra (2011) estimaram, para o reservatório da UHE de Sobradinho, localizado no Estado da Bahia, região nordeste do Brasil, uma

evaporação média anual de 2841 mm, que é um valor expressivo dado à demanda de água para atividades produtivas de alimentos numa região considerada semiárida. O reservatório de Sobradinho é tão grande (4414 Km²) que esta taxa de evaporação representa uma perda média de 380 m³/s, o que corresponde a cerca de 16% da demanda total de água no Brasil (BRASIL, 2013).

A evaporação é um importante processo do ciclo hidrológico e sua quantificação é fundamental para diversos projetos e ações de planejamento e gestão dos recursos hídricos.

Especificamente para a operação energética do Sistema Interligado Nacional - SIN, os dados de evaporação são utilizados de duas formas principais: nos estudos de simulação de operação de reservatórios e nos estudos de previsão das séries de vazões afluentes aos reservatórios dos principais aproveitamentos hidrelétricos existentes no país (OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO - ONS, 2004).

Da mesma forma, as perdas por evaporação devem ser consideradas no planejamento da expansão do sistema elétrico brasileiro. Além disto, para o gerenciamento atual, estimativas mais precisas deste processo refletem em estudos mais confiáveis de previsões de cenários de oferta hídrica e energética.

Segundo Cantarani et al. (2009), a disponibilidade e confiabilidade da geração hidrelétrica dependem de condições climáticas, que podem sofrer alterações em consequência das mudanças no clima global. Neste sentido, o conhecimento mais preciso do processo de evaporação, também, é importante para o gerenciamento de riscos de empreendimentos hidrelétricos.

Todas estas situações requerem dados confiáveis de evaporação, entretanto, medidas diretas desta variável, em escala espacial e temporal adequada, não existem em quantidade suficiente, seja por uma limitação técnica ou financeira. Desta forma, estimativas baseadas em métodos fundamentados em

princípios físicos ou em relações empíricas que utilizam dados climatológicos comuns são usadas com frequência no meio acadêmico e profissional como alternativas para suprir esta carência.

Neste contexto, foi desenvolvido um estudo no reservatório da Usina Hidrelétrica (UHE) de Camargos, localizado na região do Alto Rio Grande, sul de Minas Gerais, utilizando dados climatológicos e operacionais de um período de 3 anos (2010 a 2012).

Objetivou-se neste estudo estimar as taxas de evaporação diária, mensal e anual do reservatório da UHE de Camargos (para o período de 2010 a 2012), por meio de diferentes metodologias e comparar os resultados obtidos com as taxas de evaporação atualmente adotadas pelo ONS para operação desta usina.

Além disto, objetivou-se caracterizar a Pegada Hídrica da UHE de Camargos, com base na sua produção de energia elétrica e nas taxas de evaporação estimadas pelas diferentes metodologias, comparando os resultados obtidos com valores indicados para outras usinas no Brasil e no mundo.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Pegada Hídrica

Na década de 1990 surgiu o conceito de Pegada Ecológica como sendo a determinação da área de terra necessária para suprir as necessidades de uma dada população, sem que exista prejuízo ao ecossistema. No início deste século, foi introduzido o conceito Pegada Hídrica definida como o volume total de água utilizado, direta ou indiretamente, durante a produção de bens e serviços (HOEKSTRA et al., 2011).

O termo foi escolhido em analogia à Pegada Ecológica, mas as raízes da Pegada Hídrica estão mais presentes nos estudos hídricos do que nos estudos ambientais. A determinação da Pegada Hídrica é capaz de quantificar o consumo de água total ao longo de uma cadeia produtiva. Assim, quando maior a Pegada Hídrica menor é a eficiência do uso dos recursos hídricos, para uma mesma finalidade.

Considerando que os recursos de água doce do mundo são limitados, a Pegada Hídrica é um indicador muito útil, uma vez que ela mostra quando, onde e como os consumidores, produtores, processos e produtos individuais demandam este recurso limitado.

Mekonnen e Hoekstra (2011) classificaram a Pegada Hídrica da seguinte maneira:

- Pegada Hídrica Verde: é o volume de precipitação consumido durante o processo de produção. Esta é, particularmente, relevante para os produtos agrícolas e florestais, correspondendo ao total de água da chuva que sofre evapotranspiração, somada à água incorporada nos produtos agrícolas e florestais colhidos.

- Pegada Hídrica Cinza: indica o grau de poluição de água doce associada ao processo de produção. Os autores definem essa categoria como sendo o volume de água doce que é requerida para assimilar a carga de poluentes.
- Pegada Hídrica Azul: é o indicador do consumo de água doce superficial ou subterrânea. A perda de água por evaporação, durante o processo produtivo, pode ser incluída nesta categoria.

2.1.1 Pegada Hídrica de Usinas Hidrelétricas

A Pegada Hídrica para geração de energia a partir de usinas hidrelétricas é bem superior à Pegada Hídrica de outras fontes primárias de energia, exceto para a geração de energia a partir de biomassa em virtude do consumo de água para irrigação das culturas voltadas para este fim (Tabela 1).

Tabela 1: Pegada Hídrica de fontes primárias de energia (GERBENS-LEENES; HOEKSTRA; MEER, 2008)

Fontes Primárias de Energia		Pegada Hídrica Média Global (m ³ /GJ)
Não Renovável	Gás Natural	0,11
	Carvão	0,16
	Derivados de Petróleo	1,06
	Urânio	0,09
Renovável	Energia Eólica	0,00
	Energia Solar	0,27
	Energia Hídrica	22,30
	Energia da Biomassa	71,54

A partir de 2011, a Pegada Hídrica, para geração de energia, tornou-se mais discutida, provocada pelo seguinte questionamento: as usinas hidrelétricas caracterizam-se apenas como usuários instalados na calha dos rios ou elas, também, retiram água, ou seja, elas são consideradas como uso não-consuntivo ou consuntivo dos recursos hídricos (MEKONNEN; HOEKSTRA, 2011).

A Pegada Hídrica das 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; demanda de energia; tamanho (área) do reservatório; fatores climáticos; taxas de evaporação.

Para Mekonnen e Hoekstra (2012), a relação da área inundada pela potência instalada das usinas (ha / MW) repercute, em uma relação linear e crescente, de forma significativa na sua Pegada Hídrica. Em geral, as hidrelétricas que inundam uma grande área por unidade de capacidade instalada apresentam uma maior Pegada Hídrica do que aquelas que alagam uma pequena área por unidade de capacidade instalada.

De acordo com Mekonnen e Hoekstra (2012), a Pegada Hídrica pode ser quantificada a partir da potência instalada (Pegada Hídrica Teórica) ou da geração real de energia da usina (Pegada Hídrica Real). Além disto, para estes autores, o volume de água consumido usado no cálculo da Pegada Hídrica é estimado apenas a partir da evaporação dos reservatórios, ou seja, desconsidera-se o consumo de água para operação da usina (por exemplo, para resfriamento de equipamentos, lavagem de máquinas, uso dos funcionários), admitindo que estes sejam insignificantes em relação ao volume evaporado pelo reservatório.

Alguns autores recomendam a quantificação da Pegada Hídrica a partir da evaporação líquida, ou seja, descontando o que já seria perdido por evapotranspiração real da área correspondente ao espelho d'água do reservatório.

Em outra abordagem, considera-se no cálculo o ganho de disponibilidade hídrica (consumo negativo) decorrente da regularização de vazões pelo empreendimento.

Gerbens-Leenes, Hoekstra e Meer (2009) estimaram que a média global da Pegada Hídrica de hidrelétricas é de 22 m³/GJ.

Mekonnen e Hoekstra (2012) avaliaram a Pegada Hídrica em 35 usinas hidrelétricas, localizadas em várias regiões do mundo, com diferentes condições climáticas, tamanho do reservatório e capacidade de produção de energia. Segundo estes autores, o clima e o tamanho dos reservatórios influenciaram bastante nos resultados, assim como a potência instalada e a geração de energia real das usinas. As taxas de evaporação variaram desde 486 mm/ano (reservatório Sayano Shushenskaya, na Rússia) a 3059 mm/ano (reservatório Cahora Bassa, em Moçambique). A Pegada Hídrica Real calculada variou bastante: 0,3 m³/GJ (para o reservatório San Carlos, na Colômbia) até 846 m³/GJ (reservatório de Akosombo-Kpong, na China). A média da Pegada Hídrica Teórica (obtida com base na Potência Instalada) de todas as usinas hidrelétricas estudadas foi de 39 m³/GJ, enquanto a média da Pegada Hídrica Real (considerando a geração real das usinas) foi de 68 m³/GJ.

A Tabela 2 apresenta a Pegada Hídrica das usinas hidrelétricas localizadas no Brasil que integraram o estudo de Mekonnen e Hoekstra (2012). Nestes casos, as médias da Pegada Hídrica Teórica e Real foram de 68 m³/GJ e 86 m³/GJ, respectivamente.

Tabela 2: Pegada Hídrica de hidrelétricas do Brasil (MEKONNEN; HOEKSTRA, 2012)

Hidrelétrica	Area (Km²)	Evaporação Anual (mm/ano)	Potência Instalada (MW)	Geração Real (GJ/ano)	PH Teórica (m³/GJ)	PH Real (m³/GJ)
Sobradinho	4214	2841	1050	29973600	362	399
Itumbiara	760	2239	2082	32400000	26	53
Tucuruí	2430	2378	8400	116683200	22	50
São Simão	674	2229	1635	36802800	29	41
Marimbondo	438	2330	1400	26640000	23	38
Jaguari	70	1782	460	8640000	9	14
Itaipu	1350	1808	14000	320270400	6	8

2.2 Evaporação de Lagos e Reservatórios

Evaporação é o processo de transferência de água líquida para vapor do ar diretamente de superfícies líquidas, como rios, poças, lagos e reservatórios (COLLISCHONN; DORNELLES, 2013).

As moléculas de água estão em constante movimento, tanto no estado líquido como gasoso. Algumas moléculas da água líquida têm energia suficiente para romper a barreira da superfície, entrando na atmosfera, enquanto algumas moléculas de água na forma de vapor do ar retornam ao líquido, fazendo o caminho inverso. Quando a quantidade de moléculas que deixam a superfície é maior do que a que retorna está ocorrendo o processo de evaporação.

A quantidade de energia que uma molécula de água líquida precisa para romper a superfície e evaporar é chamada calor latente de evaporação. Na temperatura de 20°C, o calor latente de vaporização da água é igual a 2,45

MJ/Kg (ALLEN et al., 1998). Portanto, são necessários 2,45 MJ de energia (na forma de radiação solar) para que ocorra a evaporação natural de 1 mm de água.

A quantidade de vapor de água que o ar pode conter é limitada e é denominada pressão de saturação. Quando o ar acima de um reservatório está saturado de vapor de água, o fluxo de evaporação se encerra, mesmo que a radiação solar esteja fornecendo a energia do calor latente de evaporação.

Desta forma, são necessárias duas condições para ocorrer o processo de evaporação:

1. Que a água líquida esteja recebendo energia (na natureza, na forma de radiação solar) para prover o calor latente de evaporação.
2. Que o ar acima da superfície líquida não esteja saturado de vapor de água.

2.2.1 Fatores que influenciam o processo de evaporação

De acordo com Collischonn e Dornelles (2013), os principais fatores que afetam a evaporação são a temperatura, a umidade do ar, a velocidade do vento e a radiação solar.

2.2.1.1 Umidade Relativa do Ar

A umidade relativa é a medida do conteúdo de vapor de água do ar em relação ao conteúdo de vapor que o ar teria se estivesse saturado. Quanto menor a umidade relativa do ar acima da superfície (mais baixa a concentração de vapor d'água), maior a taxa de evaporação.

2.2.1.2 Temperatura do Ar

A quantidade de vapor de água que o ar pode conter varia com a temperatura. Ar mais quente permite que uma maior quantidade de vapor de água esteja presente no mesmo volume de ar, quando é atingido seu grau de saturação, favorecendo a evaporação (TUCCI, 2004).

A umidade relativa pode ser expressa pela relação entre as pressões parcial (instantânea) e de saturação (máxima) de vapor de água no ar. A pressão de saturação de vapor de água varia de acordo com a temperatura do ar, como mostra a Figura 1. Assim, quanto maior a temperatura do ar, maior será a pressão de saturação de vapor d'água e, conseqüentemente, menor será a umidade relativa. Umidade relativa do ar mais baixa, conforme já comentado, propicia maior taxa de evaporação (CARVALHO; DANTAS; CASTRO NETO, 2010).

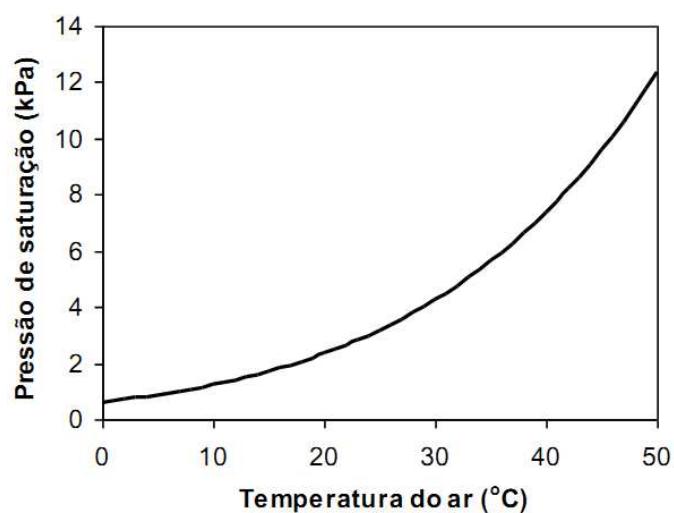


Figura 1: Pressão de saturação de vapor de água versus da temperatura do ar (CARVALHO; DANTAS; CASTRO NETO, 2010)

2.2.1.3 Velocidade do Vento

O vento renova a camada de ar diretamente em contato com os lagos e reservatórios, proporcionando a troca de volumes de ar mais saturados por outros com menos vapor d'água (mais seco).

Desta forma, com ventos fortes a turbulência é maior e a transferência desse ar úmido para regiões mais altas da atmosfera é mais rápida, logo, a umidade relativa do ar torna-se mais baixa, oferecendo condição favorável para uma maior evaporação.

Segundo Tucci (2004), existe um limite superior, em velocidade, da ação dos ventos sobre o processo de evaporação. Acima de uma determinada velocidade a evaporação torna-se independente deste fator (BERLATO; MOLION, 1981). No entanto, os referidos autores não especificam qual este valor limite.

2.2.1.4 Radiação Solar

A radiação solar é o fator mais importante para a magnitude da taxa de evaporação de lagos e reservatórios.

Quanto maior a radiação solar recebida por um corpo d'água, maior será a energia disponível e, portanto, maior a taxa de evaporação, mantidos constantes os demais fatores que influenciam o processo.

2.2.2 Métodos de estimativa do processo de evaporação

Aristóteles (A.C.) já questionava "É o vento ou o sol mais importante na promoção da evaporação natural?". Segundo Penman (1947), esta questão permaneceu aberta durante séculos enquanto ideias sobre a natureza da

evaporação eram vagas e técnicas para medir grandezas físicas relevantes ao processo eram inadequadas ou inexistentes. O início dos estudos científicos de evaporação foi em razão de Dalton (1834), que não só iniciou na técnica de medições desta variável, mas também proporcionou ideias claras sobre a natureza do processo.

Em geral, não existem medidas diretas de evaporação suficientes para cada região e condição climática. Diante disto, estimativas baseadas em métodos fundamentados em princípios físicos ou em relações empíricas que utilizam dados climatológicos comuns, constituem, muitas vezes, na única alternativa disponível (TUCCI, 2004).

Em síntese, conforme a fundamentação teórica e abordagem do processo, na literatura classificam-se os principais métodos para estimativa de evaporação de lagos e reservatórios da seguinte maneira:

- Métodos de Transferência de Massa (Aerodinâmico)
- Métodos de Balanço de Energia
- Métodos Combinado
- Balanço Hídrico
- Métodos Empíricos
- Medidas Diretas

Na primeira abordagem a evaporação baseia-se no transporte de vapor de água por um processo de difusão turbulenta. Em seguida, com base no balanço de energia, a evaporação é considerada como uma das formas de consumo da radiação incidente.

Penman (1948) combinou poder evaporante do ar (temperatura, umidade, velocidade do vento) com poder evaporante da radiação solar, dando origem a um dos métodos mais usados até hoje no mundo. Admitindo um estado de isotermia, o autor desenvolveu uma equação única, considerando os processos de transferência de massa e balanço de energia, eliminando a necessidade da variável temperatura da água, oferecendo pela primeira vez a oportunidade de fazer estimativas mais precisas de taxas de evaporação com base em dados meteorológicos padrão.

O Balanço Hídrico possibilita a determinação da evaporação com base na equação da continuidade do lago ou reservatório. Segundo Tucci (2004), o uso deste método para estimar a evaporação é teoricamente preciso, pois está associado ao princípio de conservação de massa. Na prática, as dificuldades para medir as demais variáveis limitam este procedimento. As imprecisões ficam por causa, principalmente, das contribuições diretas não controladas. O erro na sua avaliação pode produzir erros significativos na determinação da evaporação.

Os métodos empíricos são específicos para condições climáticas em que estes são desenvolvidos. Em geral, as equações empíricas existentes foram elaboradas com base no ajuste por regressão das variáveis envolvidas (evaporação, velocidade do vento, pressão de vapor d'água, radiação solar, etc.).

Os métodos de medições diretas (Tanque Classe A, Evaporímetro de Piche, entre outros) são, relativamente, caros e, muitas vezes, pouco confiáveis na representação do processo natural de evaporação em uma escala maior e em condições climáticas diferentes do microclima das estações (TUCCI, 2004).

Para cada uma destas categorias de métodos, dezenas de equações foram propostas nas últimas décadas por vários autores, em pesquisas desenvolvidas para diferentes condições climáticas e dimensões do corpo d'água; muitas vezes, baseadas em medições em campo de dados climatológicos ou, não raro, com

variáveis (como radiação solar, velocidade do vento, temperatura da água) estimadas indiretamente.

De acordo com Sene, Gash e McNeil (1991), a experiência mostra que as diferentes metodologias de estimativa do processo de evaporação, geralmente, dão resultados satisfatórios se dados meteorológicos estão disponíveis para utilização nos cálculos. No entanto, quase sempre estas informações são provenientes de estações terrestres que, muitas vezes, não representam as variações consideráveis na temperatura, umidade e velocidade do vento que pode ocorrer quando uma massa de ar passa sobre um lago ou reservatório.

Em vários trabalhos de pesquisa comparam-se (do ponto de vista da aplicabilidade, limitações, desempenho, entre outros aspectos) os métodos de estimativa de evaporação, em diferentes condições climáticas, tamanho do reservatório, disponibilidade de dados climatológicos (ABTEW, 2001; CARVALHO et al., 2011; ELVIRA et al., 2012; FINCH; GASH, 2002; ELSAWWAF; WILLEMS; FEYEN, 2010; PEREIRA et al., 2009; ROSEMBERRY, 2007; SENE; GASH; MCNEIL, 1991; SILVAPRAGASAM, 2009; TANNY et al., 2011; WINTER; ROSEMBERRY; STURROCK, 1995).

Winter, Roseberry e Sturrock (1995) descreveram mais de 30 métodos para a determinação da evaporação. Segundo os autores, a maioria destes métodos requer equipamentos meteorológicos caros e sensíveis.

Em geral, em função dos altos custos e logística envolvida para a coleta de dados em campo, os métodos de estimativa de evaporação são aplicados utilizando dados medidos pontualmente, sem considerar a variação espacial sobre o reservatório. Tal fato reflete em estimativas pouco confiáveis sobre grandes corpos d'água.

Uma alternativa a este problema é a utilização de técnicas de sensoriamento remoto, integradas a modelos combinados de balanço de energia e transferência da massa, para estimativa de evaporação com base em dados

extraídos de imagens de satélite (CURTARELLI et al., 2013; GIACOMONI; MENDES, 2008).

Abteu (2001), para um lago localizado no sul da Flórida - EUA, comparou 7 métodos de estimativa de evaporação, entre os quais: Balanço Hídrico; Tanque Classe A; Transferência de Massa; Penman e Priestley-Taylor. O autor apontou que o modelo de transferência de massa apresenta baixa capacidade de adaptação aos lagos tropicais e maiores erros na estimativa de evaporação. Os métodos de Priestley-Taylor e Penman superestimaram a evaporação em comparação com os demais métodos estudados. A estimativa pelo balanço hídrico, também, foi cerca de 10% maior do que os outros métodos, justificada pelas perdas por infiltração no lago.

Rosenberry (2007), em um estudo de um pequeno reservatório, localizado no estado americano de New Hampshire (nordeste dos EUA), avaliou o desempenho de 15 métodos de estimativa de evaporação, considerando como referência para comparações o método do Balanço de Energia - Razão de Bowen (BREB). O autor ressaltou que o método de Correlação Turbulenta (Eddy Correlation) era considerado o mais preciso, entretanto, não foi utilizado como padrão de comparação para o estudo por causa da indisponibilidade dos equipamentos necessários para medições de campo. Vários dos métodos avaliados tiveram erros significativos quando comparados com os valores obtidos com método padrão (BREB). Os resultados dos métodos de Penman, Priestley-Taylor e DeBruin-Keijman foram os mais próximos dos valores determinados com o BREB. Para estes três métodos, é necessário um número significativo de variáveis, entre as quais: temperatura do ar; pressão de vapor; saldo de radiação; e variação de calor armazenado no lago.

Elsawwaf, Willems e Feyen (2010) avaliaram a sensibilidade de 12 métodos de estimativa de evaporação, usando dados coletados em uma estação climatológica flutuante instalada no reservatório da barragem de Aswan High,

sul do Egito. Os modelos de evaporação avaliados foram agrupados em quatro classes: Métodos de Transferência de Massa; Métodos de Balanço de Energia; Métodos Combinado; e Método do Balanço de Energia - Razão de Bowen (BREB). Entre as principais conclusões do estudo, pela análise dos índices de sensibilidade revelou-se que os termos da energia e advecção no método BREB são os que mais afetam as estimativas de evaporação. O parâmetro mais sensível para os métodos combinados (Penman e Debruin-Keijman) é a variação de calor armazenado no reservatório. Para os outros métodos, os parâmetros mais sensíveis foram radiação solar, a temperatura do ar e a pressão de vapor, mas com sensibilidade mais baixa. Pelos resultados indicou-se que muitos parâmetros dos modelos avaliados podem ser fixados sem afetar, significativamente, as estimativas de evaporação.

Pereira et al. (2009) compararam a evaporação do reservatório de Sobradinho obtida pelos métodos de Linacre; Tanque Classe A (ECA) com K_p igual a 0,60; e pelo modelo CRLE (MORTON, 1983). As evaporações totais anuais estimadas foram de 2149 mm (LINACRE, 1977), 2026 mm (ECA) e 1796 mm (CRLE). Os autores avaliaram a sensibilidade da evaporação obtida pelos modelos estudados à variação da temperatura, velocidade do vento, precipitação e insolação. Para todos os métodos, o mês de maior evaporação obtida para o reservatório de Sobradinho (Outubro), caracteriza-se pela baixa precipitação e umidade relativa, pela máxima insolação e por valores mais elevados de temperatura e velocidade de vento.

Para Sivapragasam (2009), o método combinado (o original de Penman e as diversas equações derivadas dele) é o mais usado, mundialmente, para estimar evaporação de lagos e reservatórios.

2.2.2.1 Medidas Diretas

A medição da evaporação é realizada, principalmente, por equipamentos conhecidos como atmômetros e evaporímetros (BERLATO; MOLION, 1981).

O termo atmômetro é utilizado para designar qualquer instrumento que apresente uma superfície porosa por onde se processa a evaporação. Nesta categoria, o aparelho mais usado é o evaporímetro de Piche.

Os evaporímetros são reservatórios ou tanques pequenos de diferentes dimensões, de seção circular ou quadrada, instalados sobre a superfície do solo (descoberto ou vegetado) ou enterrados, onde a superfície da água se encontra livremente exposta ao processo de evaporação. O tanque Classe A é o evaporímetro mais usado mundialmente (TUCCI, 2004).

Para Collischonn e Dornelles (2013), em geral, as medições de evaporação do Tanque Classe A são consideradas mais confiáveis do que as do evaporímetro de Piche.

Além destes instrumentos clássicos, atualmente, são usados sensores modernos de detecção de alta frequência (eddy covariance, por exemplo) para medir o fluxo de vapor d'água de uma superfície líquida para atmosfera.

2.2.2.1.1 Evaporímetro de Piche

O Evaporímetro de Pichê é constituído de um tubo de vidro, fechado na extremidade superior, com cerca de 30 cm de comprimento e 1,5 cm de diâmetro, instalado dependurado dentro do abrigo meteorológico (Figura 2) e com a extremidade inferior tampada por um disco de papel de filtro fixado por uma presilha (CARVALHO; DANTAS; CASTRO NETO, 2010).



Figura 2: Evaporímetro de Piche (CARVALHO; DANTAS; CASTRO NETO, 2010)

O tubo é graduado em mm, de tal forma que a água evaporada a partir de uma superfície porosa, mantida permanentemente umedecida por água, pode ser medida pela diferença de leitura de um dia para outro.

Uma vez que este equipamento é instalado à sombra (no interior do abrigo meteorológico), a evaporação é consequência apenas do déficit de saturação do ar, não sendo influenciados, diretamente, pela velocidade do vento e radiação solar. Por este motivo, estes equipamentos são questionados quanto à validade de suas medições como índices de evaporação de lagos e reservatórios (BELATO; MOLION, 1981).

2.2.2.1.2 Tanque Classe A

Segundo Tucci (2004), existem mais de 20 tipos de tanques evaporimétricos, podendo ser reunidos em quatro classes: enterrados, superficiais, fixos e flutuantes.

O mais usado em nível mundial é o Tanque Classe A (Figura 3), com dimensões padrão de 1,2 m. de diâmetro, altura de 25 cm e lâmina d'água de 20 cm (ALLEN et al., 1998).



Figura 3: Tanque Classe A da Estação Climatológica de Lavras - MG

Os valores da evaporação medidos nos evaporímetros superam os obtidos em lagos ou reservatórios em virtude de diversos fatores, decorrentes das diferenças de volume, superfície e profundidade.

No tanque Classe A ocorre a interceptação e absorção da radiação solar pelas paredes verticais. Além disto, o ar flui em volta e por baixo do tanque, tornando a advecção de energia fator importante (BELATO; MOLION, 1981).

O efeito do vento é, também, diferente sobre um reservatório e um tanque Classe A, por causa de turbulências mecânicas locais que reduzem a velocidade do vento nos tanques e, conseqüentemente, diminui as taxas de evaporação.

O tamanho da superfície exerce, também, efeito significativo na taxa de evaporação. A renovação da camada de ar úmida sobre os tanques é mais efetiva do que em áreas maiores (reservatórios). Assim, conforme já comentado, essa diminuição da umidade do ar aumenta a taxa de evaporação.

No que diz respeito à profundidade, em lagos e reservatórios profundos, o processo de evaporação depende do balanço de energia, assim, há influência nos valores da evaporação dos dias subsequentes, enquanto no tanque Classe A isto não ocorre. Em corpos d'água profundos, uma parcela da energia radiante, recebida na primavera e no verão, é armazenada na forma de calor sensível pela massa de água, sendo utilizada no processo de evaporação no outono e inverno. Nos evaporímetros isso não ocorre, e o processo de evaporação se encontra em fase com a radiação solar, ou seja, os máximos e mínimos de evaporação coincidem com os valores extremos de radiação solar (BELATO; MOLION, 1981).

Diante do exposto, os valores medidos em tanques Classe A (e outros) não podem ser considerados, diretamente, como a evaporação de um lago ou reservatório. Na tentativa de corrigir estas diferenças, é usado um fator de proporcionalidade empírico denominado de coeficiente de tanque (K_p).

De acordo com Allen et al. (1998), o coeficiente de tanque K_p depende da umidade relativa do ar, da velocidade do vento e da cobertura do solo ao redor do tanque. Os autores indicam valores de 0,61 a 0,83 para o coeficiente do

Tanque Classe A, sendo o menor valor para o equipamento instalado sobre superfície descoberta e o maior valor para superfície gramada.

Berlato e Molion (1981) apresentam uma faixa de valores entre 0,60 e 0,86, obtidos com base em diversas publicações de estudos em reservatórios dos Estados Unidos, com diferentes espelhos d'água e profundidades. Para estes autores o coeficiente K_p assume valores diferentes ao longo do ano. Nos meses de outono / inverno a evaporação do tanque cai em virtude da redução da temperatura e radiação solar incidente, porém a evaporação do lago não diminui na mesma proporção em função da liberação de calor armazenado no corpo d'água. Assim, a relação entre as evaporações do lago e do tanque, ou seja, o coeficiente K_p é maior nesta época do ano do que na primavera / verão.

Abtew (2001), para um reservatório localizado em uma região de clima tropical (sul da Flórida, EUA), encontrou valores entre 0,64 e 0,91 para o coeficiente K_p de 7 tanques Classe A instalados no local do experimento.

Masoner, Stannard e Christenson (2008) compararam evaporações obtidas com um tanque Classe A e com outro tanque flutuante instalado em um pequeno lago na cidade de Norman (Oklahoma - EUA). Para todo o período estudado, as taxas de evaporação do tanque flutuantes foram menores do que os valores do tanque Classe A instalado nas margens do lago (em solo descoberto). Na base mensal, os valores do coeficiente de tanque K_p variaram entre 0,69 a 0,87.

Alvarez et al. (2007) avaliaram o desempenho do tanque Classe A para estimativa da evaporação de reservatórios localizados no sudeste da Espanha, pela comparação com valores obtidos por um modelo de balanço de energia. Os valores mensais do coeficiente de tanque K_p variaram, significativamente, ao longo do ano, sendo a faixa de variação maior para reservatórios mais profundos do que para os mais rasos. Os valores médios anuais de K_p situaram entre 0,76 (reservatórios com áreas maiores) a 0,86 (espelhos d'água menores).

2.2.2.1.3 Sensores de medição de Vórtices Turbulentos

O método da "Correlação de Vórtices Turbulentos" (também conhecido como "Eddy Correlation" ou "Eddy Covariance") para estimativa da evaporação é baseado na medição direta de fluxo vertical do ar e das propriedades associadas a esse fluxo, entre as quais, a quantidade de vapor de água (BERLATO; MOLION, 1981).

Segundo Dias et al. (2002), este método baseia-se na medição simultânea em alta frequência (10 Hz, por exemplo) da velocidade vertical do vento e da grandeza cujo fluxo se deseja mensurar: temperatura para o fluxo de calor sensível; umidade para o fluxo de vapor de água; e concentração mássica para um gás de efeito estufa (CO₂, por exemplo).

De acordo com Burba (2013), o método fundamenta-se no princípio de que o fluxo vertical de uma grandeza na camada superficial é proporcional à covariância (grau de inter-relação) da velocidade vertical do vento e da concentração desta grandeza (água, calor, gás carbônico, metano).

Segundo Berlato e Molion (1981), este método requer medições precisas de velocidade vertical do vento e vapor d'água. Os instrumentos devem ser de respostas rápida e suficientemente sensíveis para detectar variações simultâneas na umidade do ar e na velocidade do vento.

Atualmente, existem no mercado sensores de resposta rápida capazes de medirem, com a precisão adequada, as variáveis necessárias para aplicação deste método.

O sistema para medição da evaporação pelo método "Eddy Correlation", deve ser composto de um anemômetro ultrasônico; um analisador infravermelho de gases (com interesse no vapor d'água); e um sistema de aquisição, registro e processamento de dados (Figura 4).



Figura 4: Estação Climatológica com detalhe dos equipamentos para medição de dados necessários ao método "Eddy Correlation" (BURBA, 2013)

As medições podem ser realizadas com uma frequência de 10 Hertz, ou seja, a cada décimo de segundo, há valores de vapor de água e velocidade do vento, o que permite por correlação uma estimativa precisa da evaporação de lagos e reservatórios (BURBA, 2013).

Nas últimas décadas, com o desenvolvimento tecnológico cada vez maior para medição de dados climatológicos, diversos autores usaram este método para pesquisas em evaporação (DIAS et al., 2002; ROSEMBERRY, 2007; SENE; GASH; MCNEIL, 1991; STANNARD; ROSENBERY, 1991; TANNY et al., 2008, 2011).

2.2.2.2 Balanço Hídrico

A utilização da equação do balanço hídrico para estimativa da evaporação de lagos e reservatórios é, teoricamente, precisa, pois se fundamenta no princípio da conservação da massa. Entretanto, na prática, as dificuldades técnicas encontradas na medição precisa dos diversos componentes do balanço hídrico limitam bastante o uso deste método (BELATO; MOLION, 1981; ONS, 2004; TUCCI, 2004). O método do balanço hídrico baseia-se na equação da continuidade:

$$\Delta V = P + Q_e - E - Q_s \quad (1)$$

Em que ΔV = variação do volume de água contido no reservatório; P = precipitação direta sobre o reservatório; E = evaporação; Q_e = vazão total de entrada no reservatório; Q_s = vazão total de saída do reservatório.

Considerando o balanço hídrico, é possível estimar a evaporação, quando os demais termos da equação da continuidade são conhecidos, com pequenos erros e incertezas.

As incertezas do balanço hídrico estão associadas ao desconhecimento de alguns processos que podem influenciar nos resultados, tais como: percolação pela barragem; infiltração subterrânea; variabilidade espacial da chuva.

As principais fontes de erros na estimativa de evaporação pelo balanço hídrico são a curva cota x volume do reservatório; as vazões afluentes e defluentes.

No caso da curva cota x volume, os erros são provenientes da desatualização desta informação em função do aporte de sedimentos ao longo dos anos de vida útil da usina, causando uma redução no seu volume útil.

Em muitos casos, as vazões afluentes e defluentes dos reservatórios são muito grandes comparadas com a evaporação, e um pequeno erro nestas variáveis resulta em considerável erro na estimativa da evaporação.

De uma forma geral, as vazões afluentes são imprecisas por causa de erros nas curvas chave (quando da disponibilidade de dados de estações fluviométricas); nos ajustes das equações de regionalização de vazões; ou na calibração e nos resultados dos modelos hidrológicos do tipo chuva-vazão.

Os erros nas vazões defluentes, em geral, são em virtude das medidas indiretas destas variáveis, seja nas vazões vertidas (geralmente obtidas de curvas de descarga das estruturas extravasoras do barramento), ou nas vazões turbinadas (calculadas com base na energia gerada e no rendimento das máquinas, que, muitas vezes, estão desatualizados).

Quanto menor o reservatório, maiores serão os erros na estimativa da evaporação por causa destas imprecisões nos dados de entrada da equação do balanço hídrico. No caso de grandes reservatórios, os erros são menores, pois os volumes de evaporação são significativos, muitas vezes, superando os volumes afluentes e defluentes, minimizando, assim, a sensibilidade do método às incertezas e erros destes dados.

2.2.2.3 Métodos Empíricos

Baseadas em pesquisas diversas, correlacionando a evaporação com diferentes variáveis de maior ou menor relevância para o processo (radiação

solar, velocidade do vento, umidade do ar, temperatura, precipitação, altitude, latitude, etc.), surgiram várias equações empíricas para a estimativa da evaporação.

Berlato e Molion (1981) apresentam uma descrição detalhada dos principais métodos empíricos usados para estimar a evaporação de lagos e reservatórios:

- Equação de Thornthwaite: função apenas da temperatura do ar.
- Equação de Tanner e Pelton: função apenas do saldo de radiação.
- Equação de Jensen-Haise: depende da temperatura do ar e da radiação.
- Equação de Priestley e Taylor: função da temperatura do ar, temperatura da água, saldo de radiação.
- Equação de Linacre: depende da temperatura do ar, altitude e latitude.

Em virtude das especificidades (clima, localização geográfica, características dos reservatórios estudados, variáveis medidas ou estimadas, tipos e precisão dos equipamentos, dentre outros), estes métodos apresentam limitações para serem usados em locais diferentes de onde foram originados.

Os métodos empíricos, baseados na radiação solar, são mais promissores, pois se fundamentam na realidade física de que a energia requerida para o processo de evaporação provém da radiação. Em decorrência da alta correlação entre a radiação e a evaporação, estes métodos são mais precisos para estimativas para períodos curtos (TUCCI, 2004).

Priestley e Taylor (1972) desprezam a segunda parcela da equação de Penman (transferência de massa), com base na premissa que a camada inferior

da atmosfera está saturada e, então, o déficit de pressão de saturação é nulo. Com esta premissa, o termo do poder evaporante do ar da equação de Penman é desprezado, e a estimativa da evaporação depende apenas do saldo de radiação.

Para Reis e Dias (1998), apesar de ter sido, originalmente, apresentado como empírico, a equação de Priestley-Taylor pode ser, analiticamente, deduzida dos conceitos de Balanço de Energia e Razão de Bowen.

Linacre (1977), baseado em sucessivas correlações encontradas entre os diversos fatores meteorológicos, propôs uma fórmula simples (derivada da equação de Penman) para estimar as taxas de evaporação em diferentes climas, usando apenas dados geográficos (latitude e altitude) e temperatura do ar. Os valores estimados pelo autor, em seis localidades (que variaram desde o equador até 37° de latitude e com altitudes desde o nível do mar até 2762 m.), diferiram dos valores medidos em tanques de evaporação em 0,5 mm/dia para médias mensais, e 1,7 mm/dia para médias diárias.

2.2.2.3.1 Modelo CRLE (MORTON, 1983)

A partir da equação de Priestley e Taylor (1972), Morton (1983) propôs dois modelos que foram o coroamento de anos de estudos de evapotranspiração e evaporação em lagos e reservatórios: os modelos CRAE e CRLE.

O modelo CRAE (Relação Complementar de Evapotranspiração de Área) foi fundamentado no conceito de uma relação complementar entre evapotranspiração potencial e real.

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

Em que E_T = Evapotranspiração Real; E_{TP} = Evapotranspiração Potencial; e E_{TW} = Evapotranspiração Real em condições de superfícies úmidas (saturada).

A Figura 5 ilustra uma representação esquemática da relação complementar entre a evapotranspiração potencial e real considerada no modelo CRAE. Na ordenada é representada a evapotranspiração, enquanto na abscissa representa-se o suprimento de água para uma superfície coberta por solo-planta.

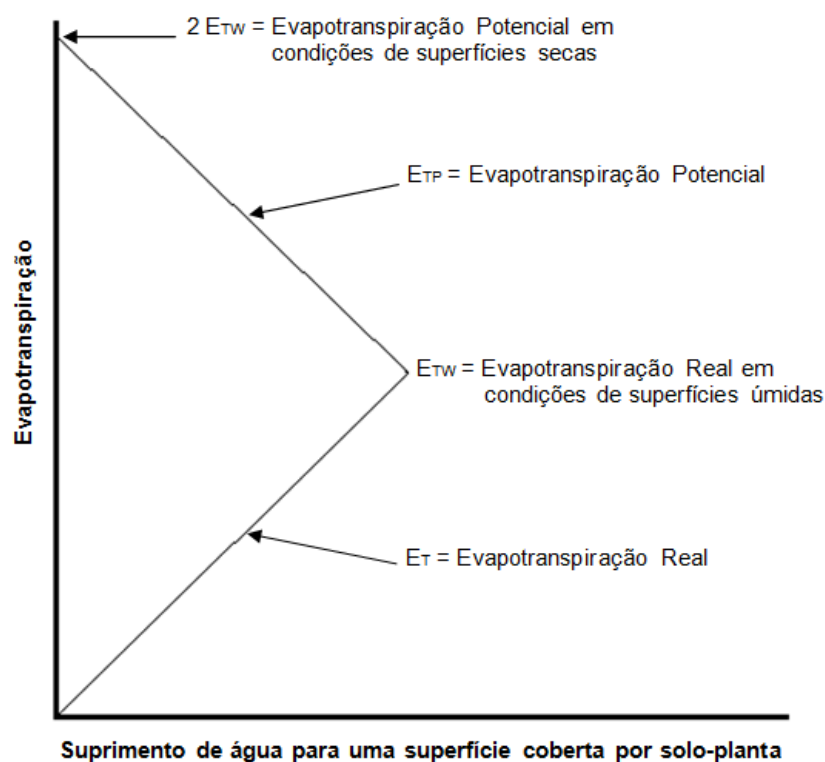


Figura 5: Representação gráfica da relação complementar entre a evapotranspiração potencial e real considerada no modelo CRAE. Adaptado de Morton (1983)

Quando não há disponibilidade de água para evapotranspiração real (E_T), consequentemente, o seu valor é igual a zero. Nestas condições, provavelmente,

o ar é tão quente e seco que a Evapotranspiração Potencial (E_{TP}) alcança a sua taxa máxima de $2E_{TW}$. O aumento do suprimento de água para a superfície coberta por solo-planta propicia um incremento na E_T , fazendo com que a camada adjacente de ar torne-se mais fria e úmida, o que, por sua vez, produz uma redução simultânea na E_{TP} . Finalmente, quando o suprimento de água aumenta, suficientemente, os valores de E_T e E_{TP} convergem para E_{TW} .

A evapotranspiração potencial (E_{TP}) é estimada originando-se da solução das equações do balanço de energia e de massa, semelhante ao método de Penman. A diferença principal é o uso de um coeficiente chamado de transferência de vapor em vez de usar a velocidade do vento no termo aerodinâmico. A evapotranspiração real, em condições de solo saturado (E_{TW}), é estimada baseada na equação de Priestley-Taylor ajustada para levar em conta os efeitos de advecção durante o inverno (ONS, 2004).

De forma similar, a evaporação de lagos e reservatórios é obtida pelo modelo CRLE (relação complementar de evaporação em lago), que se baseia na mesma relação de complementaridade válida para a evapotranspiração real e potencial (MORTON, 1983).

Para estimativa da evaporação, o modelo CRLE leva em conta, no cálculo do saldo de radiação, a variação de calor armazenado no reservatório. A solução proposta por Morton (1983) para considerar este processo no balanço de energia foi o seguinte: i) Defasagem da série mensal original da radiação solar absorvida de um número fracionário de meses (que depende da profundidade do lago); ii) Amortecimento da série mensal original por meio do método de Muskingum com parâmetro X igual a 1 (DIAS; KAN, 2008).

Dias e Kan (2008) apresentam, de forma bem clara e objetiva, as equações e premissas que regem o modelo CRLE. Segundo os autores, o desenvolvimento analítico deste modelo é muito simples e consiste,

basicamente, na equação do método empírico de Priestley e Taylor, com a temperatura da superfície da água admitida igual à temperatura de equilíbrio.

De acordo com Reis e Dias (1998), os métodos baseados no conceito de temperatura de equilíbrio subestimam a temperatura real da superfície da água, apesar de seguir o mesmo padrão sazonal. Desta forma, os modelos baseados nesta premissa, superestimam ligeiramente a evaporação de lagos e reservatórios.

Para vários autores (DIAS; KAN, 2008; MARCELINO, 1997; MORTON, 1986; REIS; DIAS, 1998), o modelo CRLE é de fácil aplicação, precisando somente de observações meteorológicas de rotina com boa precisão, e proporciona resultados satisfatórios de evaporação mensal de lagos e reservatórios.

Segundo Morton (1983), o modelo CRLE foi testado com estimativas de evaporação obtidas por balanço hídrico em 10 diferentes locais da África, Canadá e Estados Unidos. O desvio máximo e médio, obtido na taxa de evaporação média anual de todos estes casos, foi 5,6 e 3,9%, respectivamente.

Morton (1986) comparou evaporações obtidas com o modelo CRLE e com o método do balanço hídrico em 17 reservatórios localizados na América do Norte. O autor concluiu que as diferenças entre as evaporações anuais, obtidas com ambas as metodologias, foram inferiores a 10%, enquanto no intervalo mensal, as comparações não foram muito boas.

Para Reis e Dias (1998), o modelo CRLE é um modelo bastante completo, requerendo apenas médias mensais de insolação (ou radiação solar), temperatura e umidade do ar. Entretanto, para estes autores, as estimativas do modelo, para a temperatura da água e para variação de calor, armazenado no reservatório, são imprecisas e limitam o seu desempenho para estimativas da evaporação.

De acordo com Reis, Dias e Batista (1997), o modelo CRLE superestimou a evaporação de um pequeno reservatório, localizado na região metropolitana de Belo Horizonte - MG, em comparação com o Método Balanço de Energia - Razão de Bowen (EBBR).

Da mesma forma, Dias e Kan (2008) estimaram a evaporação do reservatório Foz de Areia (rio Iguaçu, Paraná) com o modelo CRLE e o método EBBR, concluindo que as estimativas com o primeiro método foram, significativamente, maiores que as do segundo.

Os modelos CRAE e CRLE ganharam popularidade no setor elétrico brasileiro e, no início dos anos 90, foram “padronizados” para a estimativa da evaporação nos reservatórios do setor (DIAS; KAN, 2008).

Atualmente, estes modelos são a base das rotinas de cálculo do programa computacional SisEvapo v2.0 - Sistema para Cálculo da Evaporação Líquida para os Reservatórios do Sistema Elétrico Brasileiro (ONS, 2004), adotado pelo governo federal e, amplamente, utilizado por empresas de energia elétrica no Brasil.

O Programa SisEvapo v2.0 é apresentado com mais detalhes no capítulo seguinte, pois foi um dos métodos utilizados neste estudo para estimativa da evaporação do reservatório da UHE de Camargos.

2.2.2.4 Métodos de Transferência de Massa (Aerodinâmico)

Dalton (1834 citado por PENMAN, 1947) demonstrou que, quando a pressão parcial de vapor d'água na atmosfera era inferior ao valor máximo (pressão de saturação) na superfície da água, então, a taxa de evaporação era, diretamente, proporcional a esta diferença de pressão.

Segundo Tucci (2004), os métodos de transferência de massa baseiam-se nesta primeira lei de Dalton, que estabelece a relação entre evaporação e pressão de vapor como:

$$E = b(e_s - e_a) \quad (3)$$

Em que E = evaporação; b = coeficiente empírico; e_s = pressão de saturação do vapor d'água na temperatura da superfície; e_a = pressão parcial de vapor d'água na temperatura do ar adjacente.

Ragona (1867 citado por PENMAN, 1947) demonstrou que a constante de proporcionalidade entre a taxa de evaporação e o déficit de pressão de vapor d'água no ar aumenta com o aumento da velocidade do vento. Assim, o efeito aerodinâmico foi introduzido pela alteração do coeficiente de proporcionalidade "b" da equação 3 por expressões propostas por diferentes pesquisadores, que levam em conta a velocidade do vento, baseada nos conceitos de camada limite que ocorre na ação do vento próximo da superfície de água (TUCCI, 2004).

Em métodos semelhantes para estimativa da evaporação, usa-se, também, a relação entre gradientes de velocidade do vento e vapor de água, como no caso do método de Correlação Turbulenta (Eddy Correlation).

De acordo com Allen et al. (1998), pelo método de transferência de massa considera-se o movimento vertical de pequenas parcelas de ar (vórtices) acima de uma grande superfície homogênea. Estes vórtices transportam massa (vapor de água e outros gases) e energia (calor) de e para a superfície de evaporação. Ao assumir que os coeficientes de transporte turbulento do vapor de água são proporcionais aos de calor, a taxa de evaporação pode ser estimada com base nos gradientes verticais de temperatura do ar e vapor de água pela razão de Bowen (ALLEN et al., 1998).

Todos estes métodos, baseados no conceito de Transferência de Massa, requerem medições precisa da pressão do vapor d'água, velocidade do vento e da temperatura do ar, em diferentes níveis acima da superfície.

2.2.2.5 Métodos de Balanço de Energia

A evaporação requer quantidades, relativamente, grandes de energia, quer sob a forma de calor latente ou energia radiante. Portanto, este processo é governado pela troca de energia na superfície e é limitado pela quantidade de energia disponível. Por causa desta limitação, é possível prever a taxa de evaporação, mediante a aplicação do princípio da conservação de energia. A energia que chega deve ser igual à energia que deixa a superfície, para o mesmo intervalo de tempo (ALLEN et al., 1998).

A equação do balanço de energia de uma superfície evaporando pode ser expressa pela seguinte equação:

$$R_L = G + H + \lambda E \quad (4)$$

Em que R_L = saldo de radiação; G = fluxo de calor no meio; H = fluxo de calor sensível; e λE = fluxo de calor latente.

Assim, conhecidos os demais termos da equação com precisão suficiente, o fluxo de calor latente pode ser estimado e, conseqüentemente, a evaporação estimada. Diante disto, considerando a equação do balanço de energia, surgiram outros métodos em que se utilizam simplificações ou relações empíricas para estimar os dados de entrada necessários.

Por exemplo, o saldo de radiação (R_L) pode ser medida ou estimada baseado em dados climáticos. Stannard e Rosenberry (1991) sugerem que

medições do saldo de radiação por um sensor "Net Radiômetro", instalado dentro do lago, são mais precisas do que valores estimados por balanço de energia com base em medições de radiação solar incidente nas proximidades do corpo d'água.

Para Berlato e Molion (1981), em condição de superfície saturada, sem limitação de água, grande parte do saldo de radiação é utilizado para o fluxo de calor latente, ou seja, para o processo de evaporação.

A estimativa do calor sensível (H) é mais complexa, requerendo medições precisas de gradientes de temperatura acima da superfície.

Berlato e Molion (1981) demonstram que, usando a razão de Bowen, o termo H da equação 4 de balanço de energia é eliminado, ficando a solução dependente de dados de temperatura e de pressão de vapor. Este método é conhecido com Balanço de Energia - Razão de Bowen (DIAS; REIS, 1998).

Segundo Finch (2002), a maior dificuldade nos métodos de balanço de energia é estimar com precisão a variação de calor armazenado no interior do reservatório, que depende, fortemente, da temperatura da água.

Na ausência desta informação, em alguns modelos utiliza-se a temperatura de equilíbrio em suas formulações (MCJANNET et al., 2008; MORTON, 1983), enquanto outros desconsideram esta parcela do balanço de energia na superfície líquida, considerando o intervalo de cálculo diário (PENMAN, 1948).

2.2.2.6 Métodos Combinados

No final da década de quarenta, surge uma importante contribuição científica para a climatologia e hidrologia: "Natural evaporation from open water, bare soils and grass" (PENMAN, 1948), cujo autor faz uma abordagem sintética, científica e firmada no conhecimento físico que rege o fenômeno,

propondo um método que, baseado em elementos meteorológicos, expressasse a estimativa da taxa de evaporação da água em contato livre com a atmosfera, da umidade da superfície do solo e da vegetação (CARVALHO et al., 2011).

Desde a época de sua publicação, o método de Penman tem sido bastante usado para estimativa da evaporação, na sua forma original ou nas inúmeras modificações introduzidas por vários autores, por exemplo, Monteith (1965), para adequação do método a condições climáticas específicas, ou em função da ausência de elementos meteorológicos que alimentam este método.

2.2.2.6.1 Método de Penman (Penman, 1948)

O método de Penman combina o poder evaporante do ar (dependente da velocidade do vento, temperatura e umidade do ar) com o da radiação solar.

Penman (1948) propõe uma solução analítica, para as equações de balanço de energia e transferência de massa (aerodinâmico), gerando uma equação única composta por estes dois termos.

O método de Penman (1948) tem como premissa o armazenamento de calor no reservatório igual a zero. Além disto, o autor adota a simplificação ao admitir que as temperaturas do ar e da água são iguais.

Para o termo aerodinâmico, Penman (1948) apresenta uma correlação empírica entre a velocidade do vento e o déficit de pressão de saturação do vapor d'água no ar, obtida dos experimentos que originaram este importante método.

Alguns autores, com experimentos em regiões com condições climáticas específicas, propuseram modificações no termo aerodinâmico da equação original de Penman, considerando correlações obtidas entre a velocidade do vento e o déficit de pressão de saturação do vapor d'água no ar.

Mota (1975) informa que, para as condições climáticas de Pelotas - RS (clima úmido e frio), o ajuste entre o termo aerodinâmico da equação de Penman e a evaporação de Piche foi bom.

Tanny et al. (2008), com estudos em pequenos lagos em Israel, concluiu que pelo método de Penman-Brusaert, em que se utiliza uma função aerodinâmica mais elaborada, apresentaram-se melhores resultados que a equação original de Penman (1948).

De acordo com Tucci (2004), o termo de transferência de massa da equação de Penman tem um peso menor na estimativa da evaporação, em relação ao termo de balanço de energia, podendo variar de 5 a 25% do valor total de evaporação, de acordo com a velocidade do vento. Assim, erros no termo aerodinâmico levam a pequenos erros na evaporação.

Portanto, a evaporação estimada pelo método de Penman é bem mais sensível ao termo do balanço de energia da equação combinada. O saldo de radiação solar influencia, significativamente, no resultado obtido com este método.

No método de Penman (1948), conforme já comentado, a parcela "G", correspondente ao fluxo de calor no meio, é desprezada. Segundo o autor, o seu valor é pequeno quanto às demais parcelas (fluxo de calor sensível - H e fluxo de calor latente - λE) que compõem o balanço de energia na superfície do reservatório (equação 4). De qualquer forma, desprezando a variação de calor no reservatório, resulta em um saldo maior de energia disponível para o processo de evaporação, superestimando (significativamente ou não) o seu valor.

Para Berlato e Molion (1981), esta simplificação pode ser válida apenas para corpos d'água pequenos, causando erros na estimativa da evaporação para reservatórios maiores. Em reservatórios mais rasos (como nos tanques Classe A), o processo de evaporação se encontra em fase com a radiação solar, ou seja, os máximos e mínimos de evaporação coincidem com os valores extremos de

radiação. Entretanto, em reservatórios profundos, uma parcela da energia radiante recebida na primavera e início do verão é armazenada na forma de calor sensível pela massa de água e, posteriormente, liberada no final do outono e no inverno, sendo utilizada nos processos de evaporação e transferência de calor sensível para a atmosfera. Nestes casos, a defasagem da evaporação quanto à radiação solar é observada, também, para o ciclo diário.

Para Sene, Gash e McNeil (1991), a maior fonte de erro na estimativa de evaporação pelo método de Penman é que as variações de calor armazenado nos lagos e reservatórios podem causar um atraso substancial (meses) entre os ciclos de calor latente e da radiação solar, sobretudo em regiões de clima temperado.

Dias e Kan (2008), em lagos profundos, verificaram que o ciclo mensal da evaporação é defasado do ciclo da radiação solar de alguns meses. Isto ocorre por causa da absorção / liberação de energia para aquecer / resfriar a água do lago.

Finch (2001) apresenta uma comparação entre o método de Penman (1948) e o método de De Bruin (1982), no qual considera-se o efeito de armazenamento de calor no reservatório, em um estudo realizado para o reservatório de Kempton Park, no sudeste da Inglaterra. Pelos resultados indicou-se que desprezar o efeito de variação de armazenamento de calor no corpo d'água resulta em uma superestimativa de 16% na evaporação anual. A taxa de evaporação é superestimada durante o período de Março a Agosto, quando o armazenamento de calor está aumentando.

Outro aspecto interessante no método de Penman (1948) é que o autor considera que a temperatura da superfície da água é igual à temperatura da camada de ar adjacente, ou seja, uma condição de isoterminia. Apoiado nesta premissa, a equação do método de Penman apresenta-se como independente da temperatura do meio, permitindo estimar a evaporação de lagos e reservatórios

baseada em variáveis climáticas comuns de estações meteorológicas de superfície.

Alguns autores criticam esta simplificação proposta por Penman (1948) demonstrando, com base no monitoramento de campo, que, na realidade, a temperatura da água é maior do que a temperatura do ar. Desta forma, o método de Penman estaria subestimando a temperatura da água ao considerá-la igual à do ar, o que implicaria em uma menor emissão da radiação de ondas longas pelo corpo d'água e, conseqüentemente, um saldo maior de energia disponível para o processo de evaporação, superestimando, assim, o seu valor.

Segundo Tucci (2004), a simplificação do método de Penman, ao considerar as temperaturas do ar e da água iguais, superestima a evaporação para regiões de clima úmido e subestima para regiões de ar mais seco.

Reis e Dias (1998), durante o período de 30 meses de monitoramento simultâneo (três vezes ao dia), observaram que a temperatura do ar foi menor do que a temperatura da água de um pequeno reservatório localizado na região metropolitana de Belo Horizonte - MG.

Da mesma forma, Dias e Kan (2008), medindo a temperatura do ar e da água no reservatório Foz de Areia (Paraná), constataram que a temperatura do ar foi menor do que da água, indicando que o fluxo de calor sensível entre o lago e a atmosfera foi positivo durante o período estudado.

Lenters, Kratz e Bowser (2005) corroboram com os autores acima, observando que a temperatura da água do lago Sparkling - Wisconsin, nos Estados Unidos, manteve-se (de 2 a 6 °C) maior do que a temperatura do ar.

Angelocci e Villa Nova (1995) monitoraram durante um ano a temperatura da água, com medidas horárias e em diferentes profundidades, de um pequeno reservatório na cidade de Piracicaba - SP, com o intuito de comparar com o padrão de variação de temperatura do ar. Em dias de alta radiação solar, a temperatura da água mostrou-se superior à do ar na maior parte

do dia e, em dias de menor radiação solar (chuvosos ou nublados), isso ocorreu nas 24 horas. Em consequência, as temperaturas médias diárias da água mostraram-se, sistematicamente, com poucas exceções, superiores à do ar em todos os meses da pesquisa.

Segundo os autores, pelos resultados demonstrou-se a capacidade da água de reter calor, em consequência de sua alta capacidade calorífica, o que contribui para que as flutuações térmicas da massa líquida sejam bem mais atenuadas que a do ar, nas escalas diária e mensal.

A estimativa da evaporação pela equação de Penman requer dados de radiação solar, temperatura e umidade do ar e velocidade do vento. As três últimas variáveis citadas são, normalmente, disponíveis nas estações meteorológicas. Quando não existem dados disponíveis de radiação solar incidente, esta variável pode ser obtida, indiretamente, por fórmulas empíricas disponíveis na literatura técnica (ALLEN et al., 1998; BLANCO; SENTELHAS, 2002; VIANELLO; ALVES, 2000).

A partir de Penman (1948), várias outras metodologias surgiram baseadas no seu método. Em geral, são metodologias que foram desenvolvidas com pequenas variações na formulação original de Penman, na maioria das vezes, para compensar a carência de determinada variável necessária, para a estimativa da evaporação.

Para Berlato e Molion (1981), a precisão dos métodos combinados para estimativa em períodos curtos (evaporação diária, por exemplo) depende, fortemente, da precisão com que é medido ou estimado o saldo de radiação solar.

Segundo Sivapragasam (2009), o uso de equação empírica para estimar o termo da radiação subestima a evaporação estimada pelo método de Penman usando dados observados desta variável.

2.2.2.6.2 Método de Penman-Monteith (MONTEITH, 1965)

Entre os métodos derivados da equação de Penman, o método de Penman-Monteith (MONTEITH, 1965), e suas várias adaptações posteriores, destaca-se por considerar na estimativa da evaporação o termo de variação do calor armazenado no reservatório. Além disto, pelo método de Penman-Monteith não se considera que a temperatura da água é igual a do ar. Nestes tipos de modelos, a temperatura da água, quando não é monitorada, é estimada baseada na temperatura de equilíbrio, semelhante ao modelo CRLE (MORTON, 1983).

Pela principal premissa do método de Penman-Monteith admite-se que o corpo de água é bem misturado (isotérmico), ou seja, nenhuma estratificação térmica, vertical ou, horizontalmente, ocorre (MONTEITH, 1965).

Quanto à variabilidade espacial da temperatura da água, é intuitivo esperar que, nas margens do reservatório, esta grandeza seja maior. Em relação ao perfil vertical da temperatura da água, nos meses de primavera e início do verão, quando a incidência de radiação solar sobre a superfície é maior, a camada superficial do lago recebe maior quantidade de calor e se aquece mais do que a região profunda. Nos outros meses, como a incidência de radiação solar é menor, o aquecimento é, praticamente, o mesmo para todo o perfil vertical do lago, não havendo diferenças significativas entre a temperatura da água na superfície e a temperatura da água no fundo (DIAS; ROCHA, 1999).

McJannet et al. (2008) desenvolveram, a partir do método combinado de Penman-Monteith, um algoritmo de cálculo para estimativa de evaporação de lagos e reservatórios, considerando variáveis como temperatura da água e profundidade média para estimar a parcela de variação de calor armazenado no corpo d'água no termo do balanço de energia. No termo representativo do processo de transferência de massa, a função aerodinâmica foi determinada com base na área do reservatório e da velocidade do vento.

Além disto, os autores utilizaram uma equação, para estimativa da temperatura da superfície da água, considerando a temperatura de equilíbrio, baseada nas premissas de que o corpo d'água é bem misturado (isto é, sem estratificação térmica) e o fluxo de calor na parte inferior do reservatório pode ser desprezado (DE BRUIN, 1982).

A temperatura de equilíbrio é definida como a temperatura da superfície na qual a troca de calor dentro da massa d'água é igual a zero (MCJANNET et al., 2008).

Reservatórios mais profundos podem armazenar calor de forma diferenciada ao longo da coluna vertical de água e não estarem em equilíbrio térmico, resultando em uma temperatura da superfície maior ou menor do que a temperatura de equilíbrio.

Para Reis e Dias (1998), os métodos baseados no conceito de temperatura de equilíbrio tendem a subestimar a temperatura real da superfície da água, apesar de seguir o mesmo padrão sazonal. Desta forma, os modelos baseados nesta premissa, superestimam, ligeiramente, a evaporação de lagos e reservatórios, pois temperaturas da água menor provocam erros no cálculo da emissão de radiação de ondas longas pela superfície de água.

Mekonnen e Hoekstra (2012) aplicaram a adaptação do método de Penman-Monteith, proposta por McJannet et al. (2008), para estimativa de evaporação de 35 reservatórios (com áreas variando de 2 a 8500 Km²) de usinas hidroelétricas, localizadas em várias regiões do mundo (com condições climáticas distintas), com o intuito de caracterizar a Pegada Hídrica destes aproveitamentos.

O modelo proposto por McJannet et al. (2008), baseado no método de Penman-Monteith, foi testado pelos autores com dados monitorados em sete diferentes locais na Austrália (pertencentes às bacias hidrográficas dos rios Murray e Darling), resultando em erros na estimativa da evaporação média

diária menores do que 10%, quando comparado com os valores medidos no tanque Classe A. Em termos de temperatura da água (média diária), o erro entre os valores medidos e os valores estimados com a metodologia proposta (baseada na temperatura de equilíbrio) foram inferiores a 6%.

McJannet et al. (2008) realizaram, também, análise de sensibilidade do modelo a erros ou incertezas em cada uma das variáveis de entrada. Erros de até 50% na profundidade do reservatório não repercutiram de forma significativa no erro na estimativa da evaporação (da ordem de 1%). O efeito da profundidade foi mais observado no padrão temporal da evaporação do que nos totais anuais. O aumento da profundidade resulta em elevação do calor armazenado, durante meses mais quentes e decréscimo ao longo dos meses frios. Assim, superestimativas na profundidade tendem a causar redução na evaporação, durante os meses do ano em que o corpo d'água está mais quente (no verão, por exemplo) e aumento nas taxas de evaporação quando a água está mais fria (inverno).

A sensibilidade na estimativa da evaporação pelo método de Penman-Monteith, proposto por McJannet et al. (2008), é maior para erros cometidos na determinação da área do reservatório. Quanto maior a área do espelho d'água menor será a função do vento (equação 24) e, conseqüentemente, menor será a taxa diária de evaporação. Entretanto, considerando apenas este aspecto equacional, os erros foram pequenos nas taxas de evaporação (inferior a 1%). A influência maior do erro na estimativa da área média se dá, diretamente, no erro no volume de água evaporado, uma vez que este é obtido pelo produto da área do reservatório pela altura de evaporação.

2.2.2.7 O coeficiente Albedo de corpos d'água

Uma quantidade considerável de radiação solar que atinge a superfície da Terra é refletida. A fração da radiação solar refletida pela superfície é conhecida como o albedo (ALLEN et al., 1998).

O albedo é uma grandeza característica dos materiais que indica a sua capacidade de reflexão, ou seja, de refletir para a atmosfera a radiação solar que a atinge. O seu valor é adimensional, variando de 0 a 1, crescente à medida que se aumenta a parcela de radiação refletida.

De acordo com Carvalho, Dantas e Castro Neto (2010), este coeficiente de reflexão influencia, diretamente, na disponibilidade de energia para o processo de evaporação. Ocorrendo maior reflexão (maior albedo), haverá menor energia disponível.

Para a água, na literatura podem ser encontrados valores de albedo entre 0,03 a 0,10 (Tabela 3), ou seja, de 3 a 10% da radiação solar incidente sobre um espelho d'água reflete para atmosfera, ficando disponível de 90 a 97% da radiação solar incidente para alimentar os processos que ocorrem na superfície.

Tabela 3: Valores de albedo indicados pela literatura para superfície de água

Autor	Albedo (a)
Penman (1948)	0,05
Monteith (1965)	0,07
Linacre (1977)	0,05
De Bruin (1982)	0,06
Morton (1983)	0,05
Tucci (2004)	0,03 a 0,10
Lenters; Kratz; Bowser (2005)	0,07
McJannet et al. (2008)	0,08
Mekonnen e Hoekstra (2011)	0,07

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da Área de Estudo: Usina Hidrelétrica de Camargos

A área de estudo compreende o reservatório da Usina Hidrelétrica (UHE) de Camargos, cuja barragem com 37 metros de altura (Figura 6) está implantada na calha do rio Grande, na coordenada geográfica $-21^{\circ} 20'$ e $-44^{\circ} 37'$, Itutinga - Minas Gerais.

De acordo com Brasil (2006), a bacia do rio Grande, com área total de 143173 km², compreendendo partes dos estados de Minas Gerais e São Paulo, pertence à região hidrográfica do rio Paraná (Figura 7). Esta bacia tem grande importância no contexto da geração hidroelétrica brasileira, representando, aproximadamente, 11,7% da potência instalada nacional, com uma capacidade de 7722 MW (BRASIL, 2007b).



Figura 6: Barragem da UHE de Camargos (COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS - CEMIG, 2013)

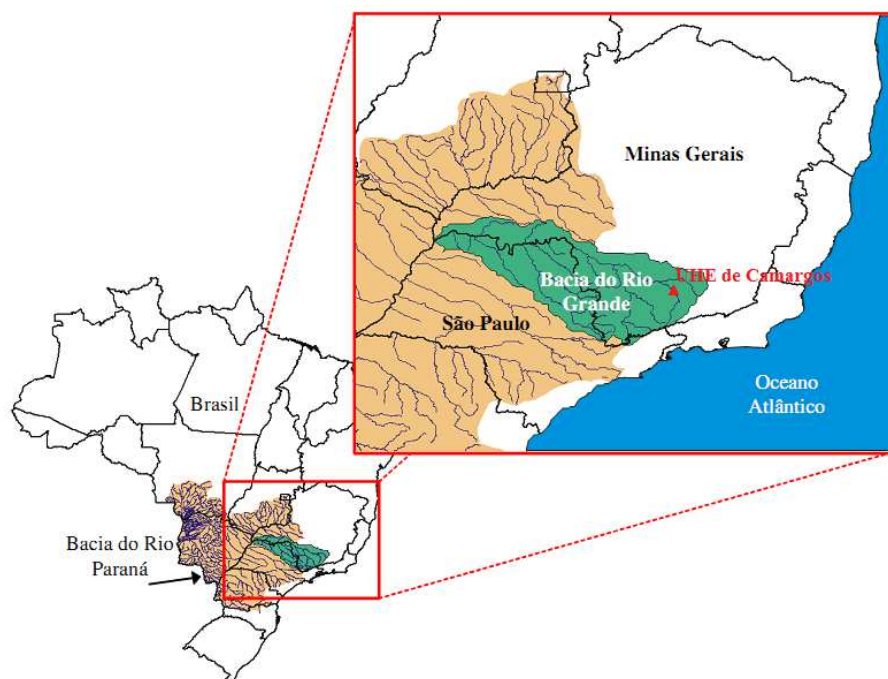


Figura 7: Localização da UHE de Camargos. Adaptado de Financiadora de Estudos e Projetos - FINEP (2007)

A UHE de Camargos entrou em operação em 1960 com potência instalada de 46 MW. A usina é operada pela CEMIG - Companhia Energética de Minas Gerais.

A usina localiza-se na cabeceira da bacia hidrográfica do rio Grande, com área de contribuição de 6228 Km² e corresponde ao primeiro aproveitamento hidrelétrico deste rio, seguido de outras 12 usinas até a confluência com o rio Paranaíba.

O clima predominante da região onde está localizado o reservatório da UHE de Camargos, de acordo com classificação de Köppen, é temperado (Cwa), caracterizado por verões amenos e úmidos e invernos frios e secos (ÁVILA et al., 2014). A temperatura média anual é de 18°C, variando de 13°C a 21°C, e a precipitação média anual de 1500 mm, com valores variando de 900 a 2300 mm.

O reservatório da UHE de Camargos apresenta um volume útil de 792 hm³, com N.A Normal Operativo na elevação de 910 metros; profundidade média de 8 metros e espelho d'água normal de 64 Km², inundando áreas dos municípios mineiros de Carrancas, São João Del Rei, Madre de Deus de Minas, Itutinga e Nazareno.

3.2 Dados de Geração da UHE de Camargos

A UHE de Camargos tem uma potência instalada de 46 MW, sendo 2 turbinas de 23 MW. Entretanto, por se tratar de uma usina antiga, com mais de 50 anos de operação, o seu rendimento atual é muito baixo.

A geração média diária de energia no período de 2010 a 2012 foi de 21 MW, variável ao longo dos anos (CEMIG, 2013).

Na Tabela 4 apresenta-se um resumo mensal dos dados de energia gerada pela UHE de Camargos, fornecidos pela CEMIG - Companhia Energética de Minas Gerais. Na Figura 8 ilustra-se a geração média mensal de 2010 a 2012.

Para o período estudado (2010 a 2012), as falhas nos dados diários (ausência de leitura ou inconsistência) foram inferiores a 10%, entretanto, concentraram-se nos meses de Janeiro a Abril de 2012.

É importante observar que a geração de energia pela UHE de Camargos aumenta a partir de Novembro, atingindo o pico em Janeiro; depois começa a diminuir, gradativamente, até atingir um valor mínimo em Outubro. Este padrão de distribuição é, totalmente, dependente da demanda de mercado e de intervenções do governo, como, por exemplo, a geração mínima foi observada no mês que se inicia o horário de verão no Brasil.

Tabela 4: Geração de energia pela UHE de Camargos de 2010 a 2012 (CEMIG, 2013)

Mês	Geração Mensal da UHE de Camargos (MW médio)			
	2010	2011	2012	Média
Janeiro	38	19		28
Fevereiro	25	19		22
Março	31	21		26
Abril	31	21		26
Maio	26	22	20	23
Junho	21	21	24	22
Julho	21	24	20	22
Agosto	21	12	19	17
Setembro	19	18	20	19
Outubro	13	21	15	16
Novembro	18	20	14	17
Dezembro	18	19	28	22
Média	23	20	20	21

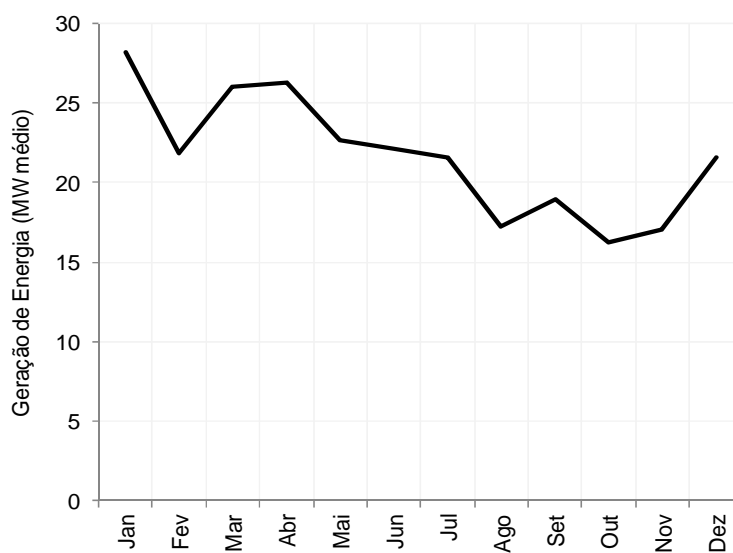


Figura 8: Geração média mensal da UHE de Camargos de 2010 a 2012 (CEMIG, 2013)

3.3 Dados Climatológicos

Em função da disponibilidade de dados climatológicos consistentes para estimativas de evaporação do reservatório da UHE de Camargos, este estudo foi desenvolvido para um período de 3 anos, de 2010 a 2012.

Os dados climatológicos adotados, no intervalo diário, foram obtidos da Estação Climatológica Principal de Lavras, distante cerca de 40 km a oeste da área de estudo, e da estação meteorológica denominada de "Marcela", instalada cerca de 6 km ao norte do reservatório da UHE de Camargos (Figura 9).

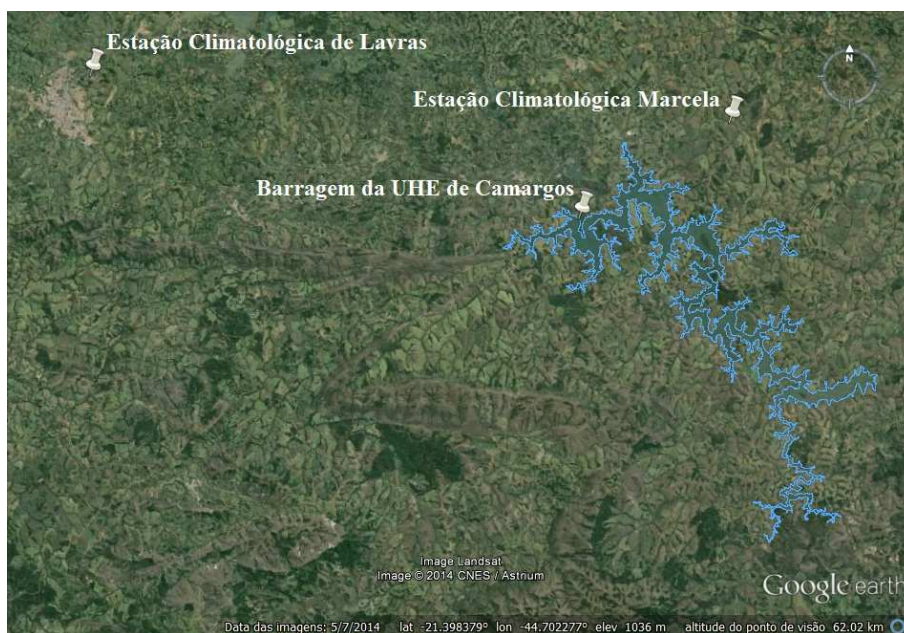


Figura 9: Localização das estações climatológicas de Lavras e Marcela em relação à barragem da UHE de Camargos (GOOGLE EARTH, 2014)

De acordo com Carvalho, Dantas e Castro Neto (2010), o clima de Lavras, segundo a classificação de Köppen, identifica-se como "Cwa", ou seja, o mesmo da região onde está instalada a estação meteorológica Marcela.

Na Tabela 5 apresenta-se um comparativo de valores médios de algumas variáveis climatológicas, observadas no período de 2010 a 2012, na estação meteorológica Marcela e na estação climatológica principal de Lavras (INMET - UFLA). Observa-se que os valores são bem próximos.

Além disto, uma característica em comum entre estas estações, de suma importância para magnitude e distribuição sazonal da radiação solar, são suas latitudes próximas: Marcela (-21° 16') e Lavras (-21° 13').

Tabela 5: Valores médios medidos na estação climatológica principal de Lavras (INMET - UFLA) e na estação meteorológica Marcela, no período de 2010 a 2012.

Variável	Estação Marcela	Estação INMET - UFLA
Velocidade do vento (m/s)	2,5	2,3
Temperatura do ar (°C)	19,1	20,6
Umidade relativa do ar (%)	73,3	71,0

3.3.1 Estação Climatológica Principal de Lavras

A estação climatológica principal de Lavras / MG (Figura 10) pertence ao Instituto Nacional de Meteorologia - INMET e está localizada dentro do campus da Universidade Federal de Lavras - UFLA, no ponto de coordenada geográfica -21° 13' e -44° 59'. A altitude do local é de 919 metros. A estação situa-se cerca de 40 km a oeste da UHE de Camargos.



Figura 10: Estação Climatológica Principal de Lavras - MG (CARVALHO; DANTAS; CASTRO NETO, 2010)

A variável medida na estação climatológica principal de Lavras, utilizada neste estudo, restringiu-se às leituras de evaporação do tanque Classe A. Para o período de 2010 a 2012, as falhas nos dados diários (ausência de leitura ou inconsistência) foram inferiores a 5%.

Na Tabela 6 apresentam-se os valores mensais de evaporação do tanque Classe A da estação climatológica de Lavras. Na Figura 11 ilustra-se a evaporação média mensal de 2010 a 2012. As taxas de evaporação do reservatório da UHE de Camargos (E_{RES} , mm/dia), apresentadas no capítulo de resultados, foram obtidas baseadas no coeficiente de tanque K_p (igual a 0,80) e das leituras do tanque Classe A (E_{TAN} , mm/dia), pela seguinte expressão:

$$E_{RES} = K_p E_{TAN} \quad (5)$$

Tabela 6: Evaporação Média do Tanque Classe A da Estação Climatológica de Lavras

Mês	Evaporação Média do Tanque Classe A (mm/mês)			
	2010	2011	2012	Média
Janeiro	139	110	119	123
Fevereiro	127	127	133	129
Março	123	103	137	121
Abril	114	112	96	107
Mai	95	92	86	91
Junho	85	78	71	78
Julho	99	91	87	93
Agosto	130	131	127	129
Setembro	128	149	132	136
Outubro	126	124	162	137
Novembro	116	123	121	120
Dezembro	133	112	151	132
Total	1415	1351	1422	1396

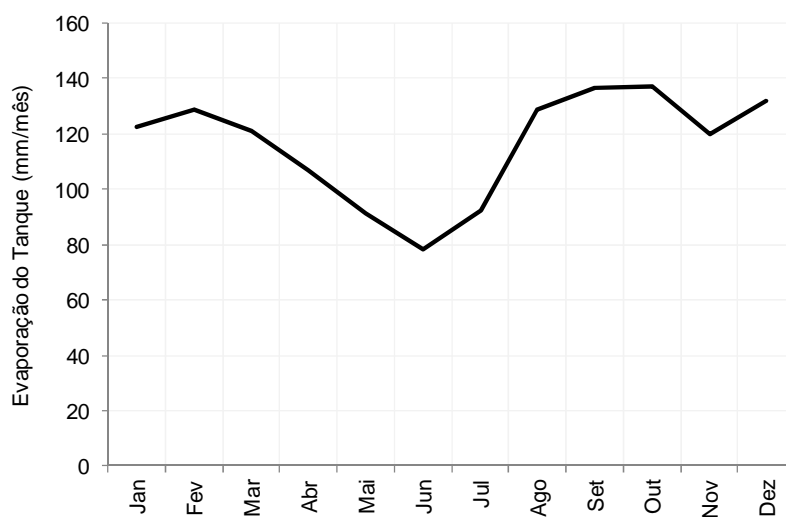


Figura 11: Estação Climatológica de Lavras: Evaporação do Tanque Classe A

3.3.2 Estação Meteorológica Marcela

A estação meteorológica de superfície Marcela (Figura 12), operada pelo Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos em Sistemas Agrícolas da UFPA, está instalada cerca de 6 km ao norte do reservatório da UHE de Camargos, no ponto de coordenada geográfica $-21^{\circ} 16'$ e $-44^{\circ} 30'$. A altitude do local é de 979 metros.



Figura 12: Estação Meteorológica Marcela

As variáveis meteorológicas foram monitoradas a cada 30 minutos de forma automática, armazenando dados de temperatura e umidade relativa do ar; velocidade do vento a 2 metros de altura; radiação solar incidente; e pressão atmosférica. Estes dados foram considerados representativos da camada-limite atmosférica sobre o espelho d'água da UHE de Camargos (o que é razoável, considerando-se que a estação está bem próxima do reservatório).

Para o período estudado, de 2010 a 2012, as falhas nos dados diários (ausência de leitura ou inconsistência) foram inferiores a 10%.

Nas tabelas 7 a 10 apresentam-se os valores mensais de temperatura média do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento e radiação solar incidente, medidas na estação meteorológica Marcela.

Nas figuras 13 a 16 ilustra-se a distribuição, ao longo do ano das variáveis medidas na estação meteorológica Marcela, adotadas nas metodologias de estimativa da evaporação do reservatório da UHE de Camargos.

Tabela 7: Temperatura Média do Ar medida na Estação Marcela

Mês	Temperatura Média do Ar (°C)			
	2010	2011	2012	Média
Janeiro	22,1	22,0	20,7	21,6
Fevereiro	23,0	22,6	21,9	22,5
Março	21,7	20,6	20,8	21,0
Abril	19,3	20,0	19,9	19,7
Mai	16,7	16,5	16,1	16,5
Junho	14,2	14,7	16,6	15,2
Julho	16,0	15,4	15,2	15,5
Agosto	16,6	18,0	16,2	16,9
Setembro	19,2	18,5	19,6	19,1
Outubro	19,6	19,6	21,6	20,3
Novembro	20,2	19,2	20,6	20,0
Dezembro	22,4	20,8	22,7	21,9
Média	19,3	19,0	19,3	19,2

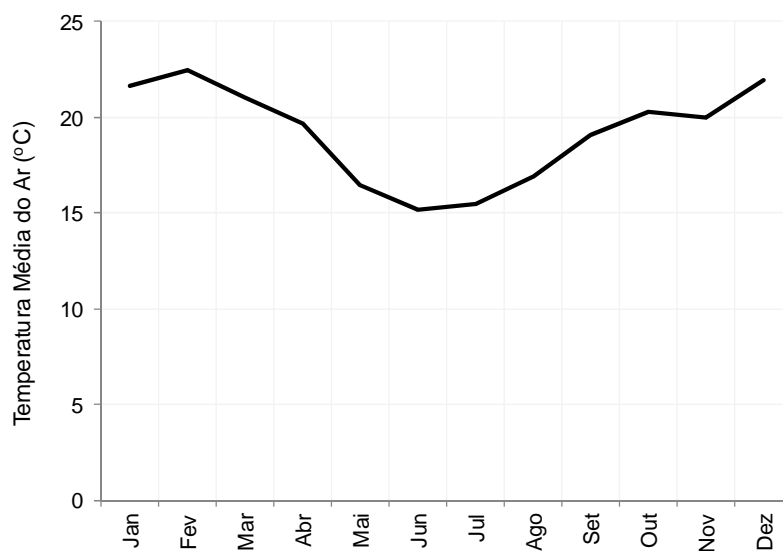


Figura 13: Estação Meteorológica Marcela: Temperatura Média do Ar

Tabela 8: Umidade Relativa do Ar medida na Estação Marcela

Mês	Umidade Relativa do Ar (%)			
	2010	2011	2012	Média
Janeiro	78,2	78,2	77,5	78,0
Fevereiro	70,5	68,2	68,6	69,1
Março	79,3	82,8	73,0	78,3
Abril	77,8	76,9	77,0	77,2
Mai	80,4	78,6	79,3	79,5
Junho	78,3	78,6	81,8	79,6
Julho	73,3	73,8	72,6	73,2
Agosto	62,9	63,2	68,0	64,7
Setembro	65,3	53,3	56,5	58,4
Outubro	74,5	75,3	55,7	68,5
Novembro	79,0	72,2	71,0	74,1
Dezembro	76,2	78,7	70,3	75,1
Média	74,6	73,3	70,9	73,0

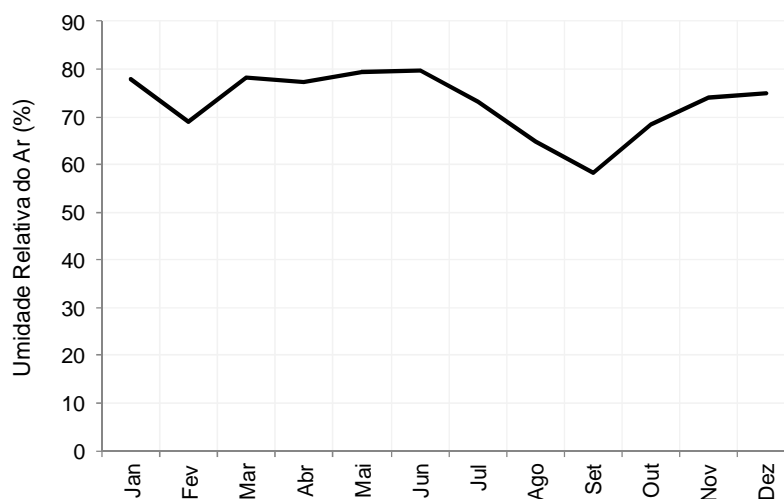


Figura 14: Estação Meteorológica Marcela: Umidade Relativa do Ar

Tabela 9: Velocidade Média do Vento medida na Estação Marcela

Mês	Velocidade Média do Vento (m/s)			
	2010	2011	2012	Média
Janeiro	2,4	1,1	3,6	2,3
Fevereiro	2,3	1,4	2,7	2,1
Março	2,4	2,0	3,3	2,6
Abril	2,9	0,7	2,7	2,1
Mai	2,3	0,6	3,3	2,1
Junho	2,8	0,7	2,3	1,9
Julho	2,3	0,9	2,7	1,9
Agosto	2,2	1,1	4,7	2,7
Setembro	2,4	2,7	3,8	3,0
Outubro	3,1	2,5	4,4	3,3
Novembro	2,5	1,5	5,0	3,0
Dezembro	2,0	1,1	3,1	2,0
Média	2,5	1,4	3,4	2,4

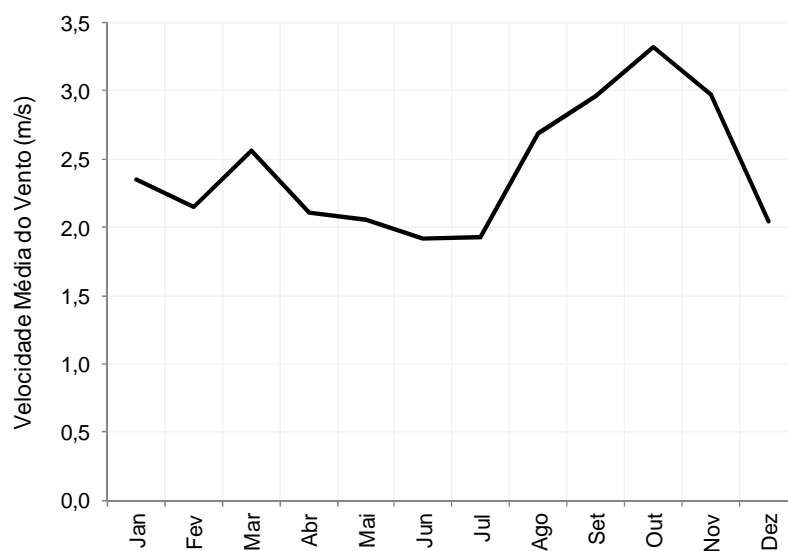


Figura 15: Estação Meteorológica Marcela: Velocidade Média do Vento

Tabela 10: Radiação Solar Incidente medida na Estação Marcela

Mês	Radiação Solar Incidente (MJ/m ² .dia)			
	2010	2011	2012	Média
Janeiro	16,6	15,6	16,3	16,1
Fevereiro	20,1	19,3	19,1	19,5
Março	15,1	12,5	15,3	14,3
Abril	13,7	14,0	12,3	13,4
Mai	11,0	11,7	10,1	10,9
Junho	11,0	11,0	8,8	10,3
Julho	11,6	11,8	11,7	11,7
Agosto	15,1	14,8	12,6	14,2
Setembro	15,1	18,3	16,2	16,5
Outubro	14,5	13,0	18,6	15,4
Novembro	13,9	15,5	15,9	15,1
Dezembro	17,1	15,0	18,0	16,7
Média	14,6	14,4	14,6	14,5

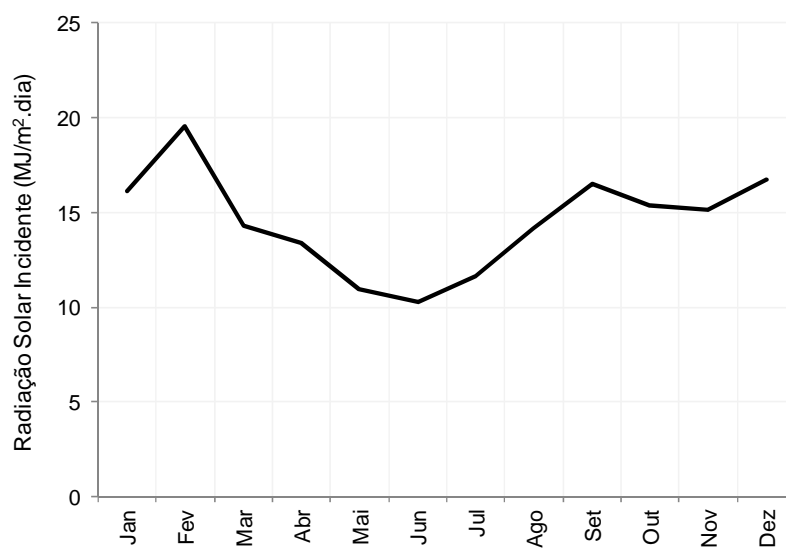


Figura 16: Estação Meteorológica Marcela: Radiação Solar Incidente

3.4 Dados de Evaporação do ONS

Atualmente, o Operador Nacional do Sistema - ONS é o agente responsável por gerenciar as informações das usinas hidrelétricas que fazem parte do SIN (Sistema Interligado Nacional).

O ONS e diversas empresas de geração de energia adotam o aplicativo computacional SisEvapo v2.0 - Sistema para Cálculo da Evaporação Líquida para os Reservatórios do Sistema Elétrico Brasileiro, para a estimativa de evaporação nos seus reservatórios (Figura 17).



Figura 17: Tela de abertura do Programa SisEvapo v2.0 (ANDRIOLO; KAVISKI, 2005)

Para cada usina hidrelétrica, são disponibilizados pelo programa 12 índices médios de evaporação (em mm), correspondentes aos meses do ano, obtidos pela regionalização de dados (normais climatológicas) das estações do INMET para o local do aproveitamento de interesse. As saídas do Programa SisEvapo v2.0 são (ANDRIOLO; KAVISKI, 2005):

- Evapotranspiração Potencial (ETP): quantidade de água transferida para a atmosfera por evaporação e transpiração, na unidade de tempo, de uma superfície extensa completamente coberta de vegetação de porte baixo e bem suprida de água.
- Evapotranspiração Real (ETR): quantidade de água transferida para a atmosfera por evaporação e transpiração, nas condições reais (existentes) de fatores atmosféricos e umidade do solo. A evapotranspiração real é igual ou menor que a evapotranspiração potencial.
- Evaporação Potencial (EP): evaporação que, teoricamente, deveria ocorrer se na realidade não houvesse influências externas que alteram a linearidade e a constância do fenômeno, como características físicas próprias de cada lago ou reservatório, diferenças climáticas e regionais.
- Evaporação Real ou do Lago (E_{Lago}): leva em consideração todas as características que não são analisadas pela Evaporação Potencial e que afetam e alteram as estimativas finais, tais como profundidade do lago, variações de temperatura e umidade do ar, vento, dentre outras.
- Evaporação Líquida: obtida pela diferença entre a evaporação real do reservatório (E_{Lago}) e a evapotranspiração real da bacia hidrográfica no local do reservatório antes da sua implantação (ETR).

Para este estudo foram usados os resultados de Evaporação Real (E_{Lago}) do reservatório da UHE de Camargos obtidas com o Programa SisEvapo v2.0.

Os dados climatológicos requeridos pelo Programa SisEvapo v2.0 são: médias mensais de temperatura do ar e insolação, e média anual de precipitação.

As informações necessárias das usinas hidrelétricas são: coordenada geográfica; altitude; área e profundidade média do reservatório; e nível normal de operação.

No próprio SisEvapo v2.0 existe um banco de dados com informações das estações do INMET (normais climatológicas) e dos principais aproveitamentos do sistema elétrico brasileiro (ANDRIOLO; KAVISKI, 2005).

O Programa SisEvapo v2.0 permite selecionar as estações climatológicas para interpolação espacial de diversas maneiras: definindo uma distância máxima da usina à estação; selecionando aquelas estações mais próximas do aproveitamento; selecionando todas as 205 estações do INMET cadastradas no programa ou apenas aquelas de Minas Gerais (32 estações).

Uma limitação do Programa SisEvapo v2.0, para estimativas atuais de evaporação de reservatórios, é por causa do uso de dados climatológicos antigos (Normais Climatológicas de 1931 a 1960 ou de 1961 a 1990), muitas vezes, diferentes das condições atuais.

Neste estudo foi usado o Programa SisEvapo v2.0 com os dados das normais climatológicas de 1961 a 1990 para todas as estações do INMET disponíveis para o processo de interpolação espacial das variáveis de interesse para a estimativa da evaporação.

Ressalta-se que, em virtude da limitação do Programa SisEvapo v2.0, as evaporações do ONS foram apresentadas (no capítulo de resultados) apenas no intervalo mensal.

3.5 Metodologias de Estimativa da Evaporação

Neste estudo foi estimada a evaporação diária do reservatório da UHE de Camargos, para o período de 2010 a 2012, por meio dos métodos de Linacre (LINACRE, 1977), Penman (PENMAN, 1948) e Penman-Monteith (MONTEITH, 1965), sendo que para este último foi adotado o algoritmo proposto por McJannet et al. (2008).

Para isto foram mantidos os valores originais de albedo dos métodos em questão, sendo: 0,05 para o método de Penman (PENMAN, 1948) e 0,08 para o método de Penman-Monteith (MCJANNET et al., 2008). A equação empírica de Linacre, na sua formulação, considera um albedo para a água igual a 0,05 (LINACRE, 1977). Da mesma forma, o Programa SisEvapo v2.0 (ONS, 2004), desenvolvido com base no modelo CRLE (MORTON, 1983), adota o valor de 0,05 para o albedo do espelho d'água dos reservatórios.

Além destes métodos, também, foram estimadas evaporações diárias para o reservatório da UHE de Camargos baseadas nas leituras no tanque Classe A da estação climatológica de Lavras e adotando um coeficiente de tanque K_p na equação 5 igual a 0,80, definido com base em uma média dos valores indicados por Abtew (2001), Alvarez et al. (2007) e Masoner, Stannard e Christenson (2008).

Por fim, para fins de comparação, foram obtidas evaporações mensais para o reservatório em estudo pelo Programa SisEvapo v2.0 (ONS, 2004).

A seguir são apresentadas as equações adotadas para os métodos de Linacre, Penman e Penman-Monteith, estabelecidas a partir dos trabalhos originais e de outras publicações (ALLEN et al., 1998; BERLATO; MOLION, 1981; BLANCO; SENTELHAS, 2002; CARVALHO; DANTAS; CASTRO NETO, 2010; MCJANNET et al., 2008; TUCCI, 2004; VIANELLO; ALVES, 2000) e, devidamente, ajustadas de acordo com as unidades do Sistema

Internacional de Medidas (SI) e das variáveis monitoradas na estação meteorológica Marcela.

3.5.1 Método de Linacre (LINACRE, 1977)

A equação de Linacre (1977), para a estimativa da evaporação de um reservatório, considerando um albedo da água de 0,05, é dada por:

$$E = \frac{\frac{700(Ta + 0,006h)}{100 - \phi} + 15(Ta - Td)}{(80 - Ta)} \quad (6)$$

Em que E = evaporação (mm/dia); Ta = temperatura média do ar (°C); h = altitude (igual a 979 m.); ϕ = latitude (igual a -21,261 graus); Td = temperatura do ponto de orvalho (°C), estimada por (CARVALHO; DANTAS; CASTRO NETO, 2010):

$$Td = 237, \frac{3 \text{Log} \left(\frac{ea}{0}, 6108 \right)}{7,5 - \text{Log} \left(\frac{ea}{0}, 6108 \right)} \quad (7)$$

Sendo: ea = pressão parcial de vapor d'água (KPa) na temperatura do ar (Ta, °C), dada pela expressão:

$$ea = \frac{0,6108 e^{\left(\frac{17,27Ta}{Ta+237,3}\right)} UR}{100} \quad (8)$$

Em que UR = umidade relativa do ar (%).

3.5.2 Método de Penman (PENMAN, 1948)

A equação do método de Penman (1948) possui a seguinte estrutura:

$$E = \left(\frac{\Delta R_L + \gamma f(u)(es - ea)}{\Delta + \gamma} \right) \frac{1}{\lambda} \quad (9)$$

Em que E = evaporação (mm/dia); λ = calor latente de vaporização (MJ/kg); Δ = declividade da curva de pressão de saturação de vapor d'água no ar à temperatura do ar (kPa/°C); R_L = saldo de radiação (MJ/m².dia); $f(u)$ = função aerodinâmica, que depende apenas da velocidade do vento a 2 metros de altura (MJ/m².dia.kPa); es = pressão de saturação de vapor d'água no ar à temperatura do ar (kPa); ea = pressão parcial de vapor d'água no ar à temperatura do ar (kPa); e γ = constante psicométrica (kPa/°C).

Para solução da equação acima foram necessários os seguintes dados (obtidos na estação climatológica Marcela): temperatura e umidade relativa do ar; velocidade do vento a 2 metros de altura; radiação solar incidente; e pressão atmosférica.

A seguir é apresentada a sequência de cálculo realizada para estimativa da evaporação da UHE de Camargos pelo método de Penman:

$$\lambda = 2,501 - (2,361 \times 10^{-3}) Ta \quad (10)$$

Em que λ = calor latente de vaporização (MJ/kg); T_a = temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$). Para as condições normais de temperatura e pressão, λ é aproximadamente 2,45 MJ/kg.

$$\gamma = (1,63 \times 10^{-3}) \frac{P}{\lambda} \quad (11)$$

Em que γ = constante psicométrica ($\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$); P = pressão atmosférica (KPa).

$$e_s = 0,6108 e^{\left(17, \frac{27T_a}{T_a+237,3}\right)} \quad (12)$$

Em que e_s = pressão de saturação de vapor d'água no ar à temperatura do ar (kPa), conforme Allen et al. (1998); T_a = temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$).

$$e_a = \frac{e_s UR}{100} \quad (13)$$

Em que e_a = pressão parcial de vapor d'água no ar à temperatura do ar (kPa); e_s = pressão de saturação de vapor d'água no ar à temperatura do ar (kPa); UR = umidade relativa do ar (%).

$$\Delta = \frac{4098 e_s}{(T_a + 237,3)^2} \quad (14)$$

Em que Δ = declividade da curva de pressão de saturação de vapor d'água no ar à temperatura do ar ($\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$); T_a = temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$).

$$f(u) = (2,33 \times 10^{-2}) + (3,37 \times 10^{-6})u_2 \quad (15)$$

Em que $f(u)$ = função aerodinâmica (MJ/m².dia.kPa); u_2 = velocidade do vento a 2 metros de altura (m/s).

$$R_L = R_s(1 - \alpha) - \sigma(T_a + 273)^4(0,34 - 0,14\sqrt{e_a}) \left(0,1 + 0,9\frac{n}{N}\right) \quad (16)$$

Em que R_s = radiação solar incidente (MJ/m².dia), medida na estação meteorológica Marcela; α = albedo da superfície da água (admitido igual a 0,05); σ = constante de Stefan-Boltzmann (igual a $4,903 \times 10^{-9}$ MJ/m².dia.K⁴); T_a = temperatura média do ar (°C); e_a = pressão parcial de vapor d'água no ar à temperatura do ar (KPa); N = duração do dia ou fotoperíodo (h), obtido pela equação abaixo apresentada em Carvalho, Dantas e Castro Neto (2010); n = número de horas de insolação ou de brilho solar (h), estimado pela equação 20 a seguir, modificada de Blanco e Sentelhas (2002).

$$N = \frac{24}{\pi} \omega_s \quad (17)$$

Em que N = fotoperíodo (h); ω_s = ângulo horário de nascer ou pôr do sol (radianos), dado por:

$$\omega_s = \arccos(-\tan \phi \tan \delta) \quad (18)$$

Em que ω_s = ângulo horário de nascer ou pôr do sol (radianos); ϕ = latitude (igual a -0,371 radianos); δ = declinação solar (radianos), igual a:

$$\delta = 0,4093 \sin\left(\frac{2\pi}{365}J - 1,405\right) \quad (19)$$

Em que δ = declinação solar (radianos); J = dia juliano (adimensional), equivalente ao número de dias transcorridos desde o dia primeiro de janeiro.

$$n = \frac{N}{0,52} \left(\frac{R_s}{R_a} - 0,29 \cos \phi \right) \quad (20)$$

$$\text{Se } \frac{R_s}{R_a} < 0,29 \cos \phi \Rightarrow n = 0$$

Em que R_s = radiação solar incidente ($\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{dia}$); N = fotoperíodo (horas); ϕ = latitude (igual a -0,371 radianos); R_a = radiação solar na ausência ou "topo" da atmosfera ($\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{dia}$), obtida pela seguinte expressão:

$$R_a = 37,586 dr (\cos \phi \sin \delta + \cos \delta \sin \phi \cos \omega_s) \quad (21)$$

Em que R_a = radiação solar na ausência ou "topo" da atmosfera ($\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{dia}$); ω_s = ângulo horário de nascer ou pôr do sol (radianos); ϕ = latitude (igual a -0,371 radianos); δ = declinação solar (radianos); dr = distância relativa Terra-Sol, definida como (CARVALHO; DANTAS; CASTRO NETO, 2010):

$$dr = 1 + 0,033 \cos\left(\frac{2\pi}{365}J\right) \quad (22)$$

Em que dr = distância relativa Terra-Sol; J = dia juliano (adimensional).

3.5.3 Método de Penman-Monteith (MCJANNET et al., 2008)

A variação da equação de Penman-Monteith proposta por McJannet et al. (2008) possui a seguinte estrutura:

$$E = \left(\frac{\Delta_w (R_L - G) + \gamma f(u) (e_w - e_a)}{\Delta_w + \gamma} \right) \frac{1}{\lambda} \quad (23)$$

Em que E = evaporação (mm/dia); λ = calor latente de vaporização (MJ/kg); Δ_w = declividade da curva de pressão de saturação de vapor d'água no ar à temperatura da água (kPa/°C); R_L = saldo de radiação (MJ/m².dia); G = variação de calor armazenado no corpo de água (MJ/m².dia); $f(u)$ = função associada à velocidade do vento e à área do reservatório (MJ/m².dia.kPa); e_w = pressão de saturação de vapor d'água no ar à temperatura da água (kPa); e_a = pressão parcial de vapor d'água no ar à temperatura do ar (kPa); e γ = constante psicométrica (kPa/°C).

Para solução da equação acima foram necessários os seguintes dados (sendo os dois primeiros fornecidos pela CEMIG e os demais obtidos na estação climatológica Marcela): área e profundidade média do reservatório da UHE de Camargos; temperatura e umidade relativa do ar; velocidade do vento a 2 metros de altura; radiação solar incidente; e pressão atmosférica.

A seguir é apresentada a sequência de cálculo realizada para estimativa da evaporação da UHE de Camargos pelo método de Penman-Monteith (MCJANNET et al., 2008).

Primeiramente, ressalta-se que em razão da semelhança com o método de Penman, algumas variáveis necessárias ao método de Penman-Monteith

foram estimadas usando equações apresentadas anteriormente, desta forma estas não foram reproduzidas novamente. Os termos em questão foram:

- λ = calor latente de vaporização (MJ/kg) → Equação 10.
- γ = constante psicométrica (kPa/°C) → Equação 11.
- e_w = pressão de saturação de vapor d'água no ar à temperatura da água (kPa) → Equação 12, substituindo T_a por T_w (temperatura da água).
- e_a = pressão parcial de vapor de água no ar à temperatura do ar (kPa) → Equação 13.
- Δw = declividade da curva de pressão de saturação de vapor d'água no ar à temperatura da água (kPa/°C) → Equação 14, substituindo T_a por T_w .

Portanto, para a estimativa da evaporação pelo método de Penman-Monteith (equação 23), restam apresentar as expressões matemáticas para os cálculos dos seguintes termos: R_L = saldo de radiação (MJ/m².dia); G = variação de calor armazenado no corpo d'água (MJ/m².dia); e $f(u)$ = função associada à velocidade do vento e a área do reservatório (MJ/m².dia.kPa), conforme expressão abaixo apresentada por McJannet et al. (2008):

$$f(u) = (3,80 + 1,57u_{10}) \left(\frac{5}{A}\right)^{0,05} \quad (24)$$

Em que $f(u)$ = função aerodinâmica (MJ/m².dia.kPa); A = área média do reservatório (igual a 64 km²); u_{10} = velocidade do vento a 10 metros de altura (m/s), estimada pela velocidade do vento a 2 metros de altura (u_2 , m/s) medida

na estação meteorológica Marcela (CARVALHO; DANTAS; CASTRO NETO, 2010):

$$u_{10} = 1,337u_z \quad (25)$$

O saldo de radiação "R_L" é a soma do saldo de radiação de ondas curtas com o saldo de radiação de ondas longas, obtida por meio das equações a seguir, indicadas por McJannet et al. (2008).

$$R_L = R_s(1 - a) + (R_i - R_o) \quad (26)$$

Em que R_L = saldo de radiação (MJ/m².dia); R_s = radiação solar incidente (MJ/m².dia), medida na estação meteorológica Marcela; a = albedo da superfície da água (igual a 0,08 para este método); R_i = radiação de ondas longas de entrada (MJ/m².dia); e R_o = radiação de ondas longas de saída (MJ/m².dia).

$$R_i = 1 - (1 - C_f) \left(0,261e^{(-7,77 \times 10^{-4} Ta^2)} \right) \sigma (Ta + 273)^4 \quad (27)$$

Em que R_i = radiação de ondas longas de entrada (MJ/m².dia); Ta = temperatura média do ar (°C); σ = constante de Stefan-Boltzmann (igual a 4,903x10⁻⁹ MJ/m².dia.K⁴); C_f = fração de cobertura de nuvens (adimensional), estimada da seguinte maneira:

$$C_f = 1,1 - (R_s / (0,75 + (2 \times 10^{-7} (-5) h) R_a) \quad (28)$$

Em que C_f = fração de cobertura de nuvens (adimensional); R_s = radiação solar incidente (MJ/m².dia); h = altitude (igual a 979 metros); R_a =

radiação solar na ausência ou "topo" da atmosfera ($\text{MJ}/\text{m}^2.\text{dia}$), dado pela equação 21.

$$\mathbf{R_o} = \varepsilon_w \sigma (\mathbf{T_w} + 273)^4 \quad (29)$$

Em que R_o = radiação de ondas longas de saída ($\text{MJ}/\text{m}^2.\text{dia}$); ε_w = emissividade da água (igual a 0,97); σ = constante de Stefan-Boltzmann (igual a $4,903 \times 10^{-9} \text{ MJ}/\text{m}^2.\text{dia}.\text{K}^4$); T_w = temperatura da superfície da água ($^{\circ}\text{C}$), estimado a partir da temperatura de equilíbrio através da seguinte equação:

$$\mathbf{T_{w,i}} = \mathbf{T_e} + (\mathbf{T_{w,i-1}} - \mathbf{T_e}) e^{\left(\frac{-1}{\tau}\right)} \quad (30)$$

Em que $T_{w,i}$ = temperatura da água no dia i ($^{\circ}\text{C}$); $T_{w,i-1}$ = temperatura da água no dia $i-1$ ($^{\circ}\text{C}$); τ = constante de tempo (dias); T_e = temperatura de equilíbrio ($^{\circ}\text{C}$), estimada por (DE BRUIN, 1982):

$$\mathbf{T_e} = \mathbf{T_n} + \frac{\mathbf{R_L^*}}{4\sigma(\mathbf{T_n} + 273)^3 + f(u)(\Delta_n + \gamma)} \quad (31)$$

Em que T_e = temperatura de equilíbrio ($^{\circ}\text{C}$); $f(u)$ = função aerodinâmica ($\text{MJ}/\text{m}^2.\text{dia}.\text{kPa}$), obtida pela equação 24; σ = constante de Stefan-Boltzmann (igual a $4,903 \times 10^{-9} \text{ MJ}/\text{m}^2.\text{dia}.\text{K}^4$); γ = constante psicométrica ($\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$), obtida pela equação 11; T_n = temperatura do bulbo úmido ($^{\circ}\text{C}$); Δ_n = declividade da curva de pressão de saturação de vapor d'água no ar à temperatura do bulbo úmido ($\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$); R_L^* = saldo de radiação à temperatura do bulbo úmido ($\text{MJ}/\text{m}^2.\text{dia}$).

$$T_n = \frac{0,066T_a + T_d \left(\frac{4098e_a}{(T_d + 237)^2} \right)}{0,066 + \left(\frac{4098e_a}{(T_d + 237)^2} \right)} \quad (32)$$

Em que T_n = temperatura do bulbo úmido ($^{\circ}\text{C}$); T_d = temperatura do ponto de orvalho ($^{\circ}\text{C}$), obtida pela equação 7; e_a = pressão parcial de vapor d'água no ar à temperatura do ar (kPa), estimada pela equação 13.

$$\Delta_n = \frac{4098 \left(0,6108e^{\left(\frac{17,27T_n}{T_n + 237} \right)} \right)}{(T_n + 237)^2} \quad (33)$$

Em que Δ_n = declividade da curva de pressão de saturação de vapor d'água no ar à temperatura do bulbo úmido (kPa/ $^{\circ}\text{C}$); T_n = temperatura do bulbo úmido ($^{\circ}\text{C}$).

$$R_L^* = R_s(1 - a) + (R_i - R_{on}) \quad (34)$$

Em que R_L^* = saldo de radiação à temperatura do bulbo úmido (MJ/m².dia); R_s = radiação solar incidente (MJ/m².dia), medida na estação meteorológica Marcela; a = albedo da superfície da água (igual a 0,08); R_i = radiação de ondas longas de entrada (MJ/m².dia), estimada pela equação 27; e R_{on} = radiação de ondas longas de saída (MJ/m².dia) na temperatura do bulbo úmido, obtido por (MCJANNET et al., 2008):

$$R_{on} = \sigma(T_a + 273)^4 + 4\sigma(T_a + 273)^3(T_n - T_a) \quad (35)$$

Em que R_{on} = radiação de ondas longas de saída ($\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{dia}$) na temperatura do bulbo úmido, σ = constante de Stefan-Boltzmann (igual a $4,903 \times 10^{-9} \text{ MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{dia} \cdot \text{K}^{-4}$); T_a = temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$); T_n = temperatura do bulbo úmido ($^{\circ}\text{C}$), estimado pela equação 32.

A constante de tempo (τ , dias) é obtida conforme De Bruin (1982):

$$\tau = \frac{\rho_w c_w p}{4\sigma(T_n + 273)^3 + f(u)(\Delta_n + \gamma)} \quad (36)$$

Em que τ = constante de tempo (dias); ρ_w = densidade da água ($1000 \text{ Kg}/\text{m}^3$); c_w = calor específico da água ($0,0042 \text{ MJ}/\text{Kg} \cdot ^{\circ}\text{C}$); p = profundidade média do reservatório (igual a 8 metros); σ = constante de Stefan-Boltzmann (igual a $4,903 \times 10^{-9} \text{ MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{dia} \cdot \text{K}^{-4}$); γ = constante psicométrica ($\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$), obtida pela equação 11; $f(u)$ = função aerodinâmica ($\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{dia} \cdot \text{kPa}$), obtida pela equação 24; T_n = temperatura do bulbo úmido ($^{\circ}\text{C}$), estimado pela equação 32; Δ_n = declividade da curva de pressão de saturação de vapor d'água no ar à temperatura do bulbo úmido ($\text{kPa}/^{\circ}\text{C}$), conforme equação 33.

Por fim, a variação de calor armazenado no reservatório "G", requerido pelo método de Penman-Monteith (equação 23), é estimada baseada na expressão indicada por Finch (2001):

$$G = \rho_w c_w p (T_{wi} - T_{wi-1}) \quad (37)$$

Em que G = variação de calor armazenado no reservatório ($\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{dia}$); ρ_w = densidade da água ($1000 \text{ Kg}/\text{m}^3$); c_w = calor específico da água ($0,0042$

MJ/Kg.°C); p = profundidade média do reservatório (igual a 8 metros); $T_{w,i}$ = temperatura da água no dia i (°C); $T_{w,i-1}$ = temperatura da água no dia i-1 (°C).

3.6 Método de cálculo da Pegada Hídrica (MEKONNEN; HOEKSTRA, 2011)

O cálculo da Pegada Hídrica da UHE de Camargos foi realizado baseado nos totais evaporados estimados pelos métodos indicados anteriormente, e os totais de energia elétrica produzida pela usina, fornecidos pela Companhia Energética de Minas Gerais - CEMIG. De acordo com Mekonnen e Hoekstra (2011), a Pegada Hídrica para geração hidrelétrica pode ser obtido pela seguinte expressão:

$$PH = \frac{E}{H} \quad (38)$$

Em que PH = Pegada Hídrica anual (m^3/GJ); H = produção anual de energia (GJ/ano), fornecido pela CEMIG; E = evaporação anual (m^3/ano), obtida pelo produto da altura de evaporação (em m/ano) pela área média do reservatório (igual a 64 Km^2).

Além da estimativa anual, o comportamento sazonal da Pegada Hídrica, também, foi analisado, verificando-se os meses do ano em que a mesma é mais crítica, uma vez que esta depende tanto das condições climáticas da região quanto da demanda de mercado por energia elétrica.

Para o cálculo da Pegada Hídrica Mensal, foram adotadas as áreas médias mensais do reservatório da UHE de Camargos, que variaram de 55 Km^2

(no mês de Dezembro) a 73 Km² (em Maio), obtidas com base em leituras diárias de níveis d'água e da curva cota x área do reservatório.

Ressalta-se que foi considerada no cálculo a geração real de energia pela UHE de Camargos no período estudado (2010 a 2012), ou seja, a Pegada Hídrica estimada foi a real e não a teórica (obtida baseada na potência instalada).

Além disto, nessa metodologia de cálculo proposta por Mekonnen e Hoekstra (2011), desconsidera-se o consumo de água para operação da usina (por exemplo, para resfriamento de equipamentos, lavagem de máquinas, uso dos funcionários), admitindo que estes sejam insignificantes em relação ao volume evaporado pelo reservatório. Neste caso, o consumo usado no cálculo da Pegada Hídrica corresponde à evaporação do reservatório estimada pelas diferentes metodologias apresentadas anteriormente.

Na prática, para todos os métodos de estimativas de evaporação estudados, primeiramente, foram calculadas as Pegadas Hídricas mensais do período de 2010 a 2012 e depois acumuladas anualmente, para, então, obter-se um valor médio anual para UHE de Camargos. No caso do Método do ONS, como o resultado do Programa SisEvapo v2.0 são 12 valores de evaporações médias mensais (provenientes das normais climatológicas), não foi possível gerar uma série de evaporação de 2010 a 2012 e, então, a Pegada Hídrica Anual foi calculada com base na soma dos 12 valores de evaporação média mensal e da energia média anual informada pela CEMIG para o período em estudo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir são apresentados os resultados obtidos, resumidos em termos de valores de evaporações diárias, mensais e anuais, para o período de 2010 a 2012, estimadas para o reservatório da UHE de Camargos pelas diferentes metodologias estudadas.

Tendo em vista que o Programa SisEvapo v2.0 (ONS, 2004) fornece como resultados evaporações apenas no intervalo mensal, a evaporação adotada pelo ONS foi apresentada neste intervalo de cálculo e depois acumulada para se obter uma taxa média anual. Desta forma, as comparações entre os métodos foram mais detalhadas para as taxas de evaporações mensais.

4.1 Evaporação Média Diária

Na Tabela 11 apresentam-se os valores de evaporação diária do reservatório da UHE de Camargos estimadas pelos métodos do Tanque Classe A, Linacre, Penman e Penman-Monteith. Ressalta-se que os resultados de todas as metodologias seguiram uma distribuição normal.

Tabela 11: Evaporação média diária do reservatório da UHE de Camargos para o período de 2010 a 2012, obtida pelos métodos de Tanque Classe A, Linacre, Penman e Penman-Monteith

Método	Evaporação Diária (mm/dia)		
	Máxima	Média	Mínima
Tanque Classe A	8,0	4,0	0,4
Linacre	6,3	3,6	1,8
Penman	8,1	3,7	0,3
Penman-Monteith	8,8	3,7	0,4

Todos os métodos apresentaram valores de evaporação média diária próximos, com variação máxima de 0,4 mm/dia. A evaporação média diária obtida com o método de Linacre foi a de menor valor (3,6 mm/dia), enquanto o método do Tanque Classe A indicou a maior média para o período em estudo (4,0 mm/dia). Para o caso em estudo (reservatório raso e com pequeno espelho d'água), pelos métodos de Penman e Penman-Monteith indicaram-se os mesmos valores de evaporação média diária (3,7 mm/dia).

As variações de valores na escala diária não significam erros dos métodos estudados. Os resultados obtidos podem estar associados a condições meteorológicas distintas ao longo do período de estudo (2010 a 2012). Isto significa que, no intervalo diário, os valores máximos e mínimos estimados de evaporação são bastante sensíveis às medidas em campo de valores extremos da temperatura e umidade do ar, velocidade do vento e, principalmente, radiação solar (que, além da época do ano, depende de condições momentâneas, como por exemplo, se está chovendo, nublado ou com céu aberto).

Todos os métodos apresentam o mesmo padrão sazonal de evaporação, com as taxas mínimas diárias estimadas para os meses de Junho e Julho (quando foram observados valores menores de temperatura do ar e radiação solar), e as taxas máximas obtidas para os meses de Fevereiro e Setembro (caracterizados por maiores temperatura do ar e radiação solar). A velocidade do vento e a umidade relativa do ar, também, justificam a distribuição sazonal da evaporação, porém com menor sensibilidade dos métodos a estas variáveis.

As figuras 18 a 21 apresentam a distribuição da evaporação diária para o período de 2010 a 2012, obtida com a aplicação dos métodos do Tanque Classe A, Linacre, Penman e Penman-Monteith.

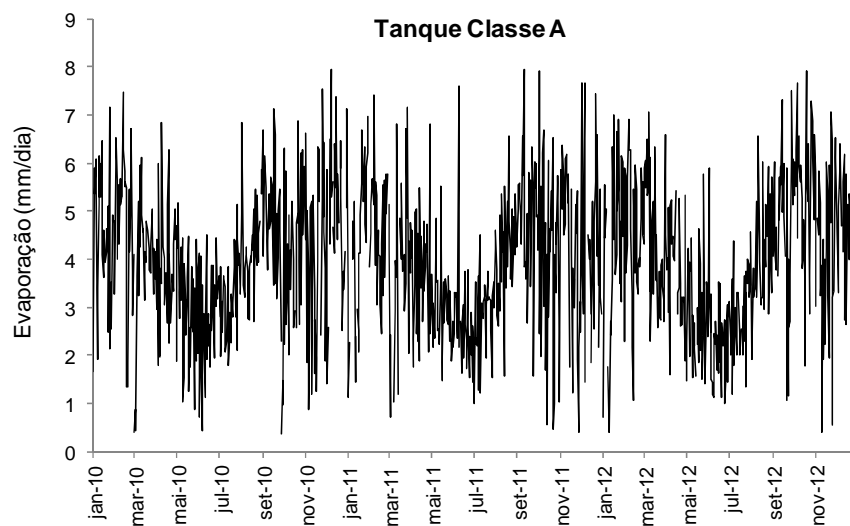


Figura 18: Evaporação diária do reservatório da UHE de Camargos para o período de 2010 a 2012, obtida pelo Método do Tanque Classe A (K_p igual a 0,8)

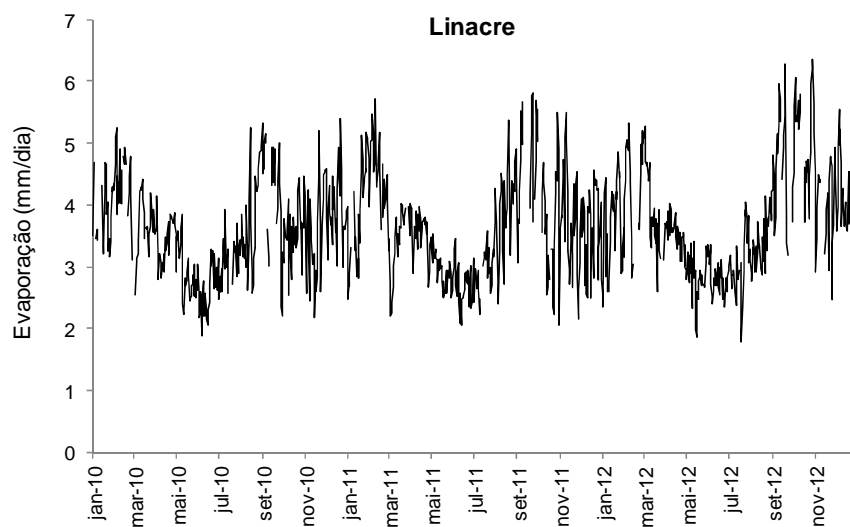


Figura 19: Evaporação diária do reservatório da UHE de Camargos para o período de 2010 a 2012, obtida pelo Método de Linacre

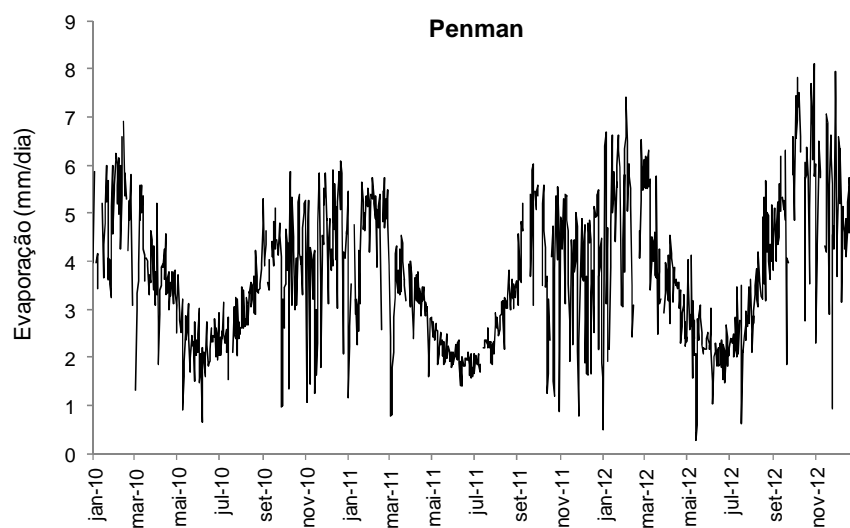


Figura 20: Evaporação diária do reservatório da UHE de Camargos para o período de 2010 a 2012, obtida pelo Método de Penman

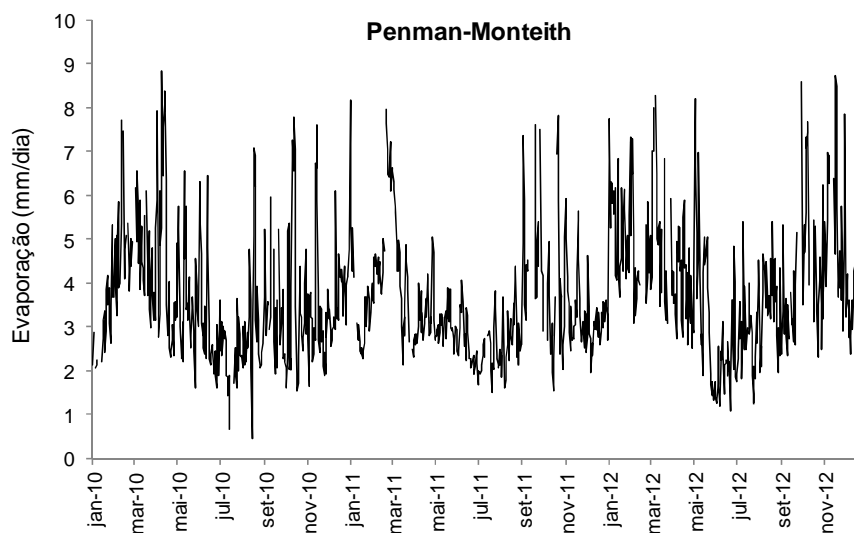


Figura 21: Evaporação diária do reservatório da UHE de Camargos para o período de 2010 a 2012, obtida pelo Método de Penman-Monteith

4.2 Evaporação Mensal

A seguir são apresentados os valores de evaporação mensal do reservatório da UHE de Camargos estimados pelo método do Tanque Classe A (K_p igual a 0,80); método de Linacre; método de Penman; método de Penman-Monteith; e método do ONS (2004) (Programa SisEvapo v2.0).

4.2.1 Método do Tanque Classe A

A Tabela 12 apresenta a evaporação estimada a partir das leituras do Tanque Classe A, cujos valores refletem muito bem todos os fatores que influenciam no processo.

Na Figura 22 apresenta-se a evaporação mensal do reservatório da UHE de Camargos, para o período de 2010 a 2012, enquanto na Figura 23 ilustram-se as médias mensais.

As taxas máximas e mínimas de evaporação estão diretamente associadas ao padrão sazonal das variáveis climatológicas, com os picos estimados para os meses de maiores temperaturas do ar e radiação solar (Fevereiro, Setembro e Dezembro) e velocidade do vento (Outubro), assim como no mês de menor umidade relativa do ar (Setembro).

A taxa mínima de evaporação foi bem definida para o mês de Junho, com menor temperatura do ar, radiação solar e velocidade do vento, simultaneamente com elevada umidade do ar.

Tabela 12: Evaporação mensal do reservatório da UHE de Camargos estimada pelo método do Tanque Classe A (K_p igual a 0,80)

Mês	Evaporação Mensal (mm/mês)			
	2010	2011	2012	Média
Janeiro	139	110	119	123
Fevereiro	127	127	133	129
Março	123	103	137	121
Abril	114	112	96	107
Maió	95	92	86	91
Junho	85	78	71	78
Julho	99	91	87	93
Agosto	130	131	127	129
Setembro	128	149	132	136
Outubro	126	124	162	137
Novembro	116	123	121	120
Dezembro	133	112	151	132
Total	1415	1351	1422	1396

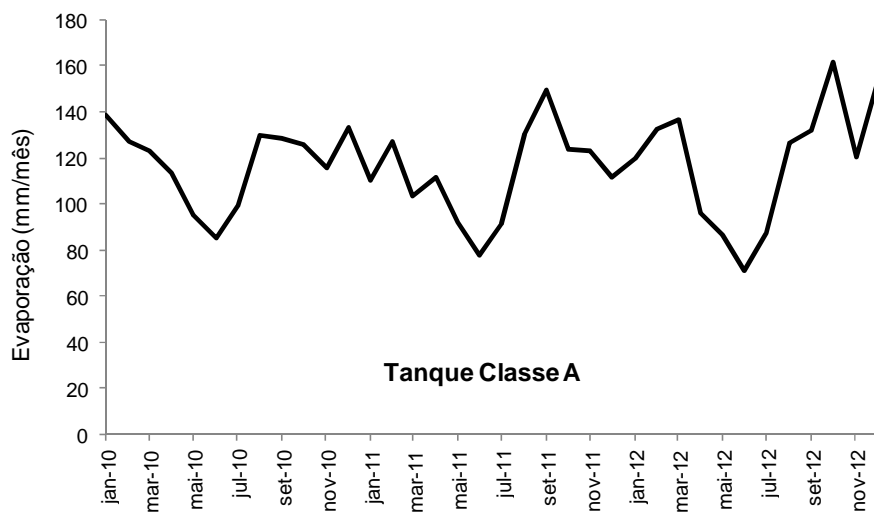


Figura 22: Evaporação mensal do reservatório da UHE de Camargos para o período de 2010 a 2012, obtida pelo Método do Tanque Classe A (K_p igual a 0,80)

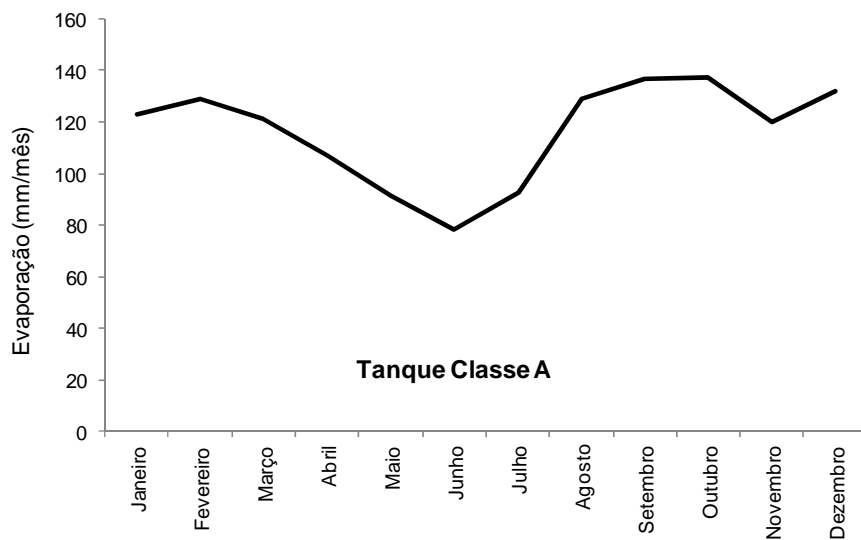


Figura 23: Evaporação mensal do reservatório da UHE de Camargos obtida pelo Método do Tanque Classe A (K_p igual a 0,80)

4.2.2 Método de Linacre

Na Tabela 13 apresenta-se a evaporação estimada pelo método de Linacre, onde se pode observar uma menor variação de evaporação ao longo do ano, uma vez que este método considera apenas a temperatura média do ar na sua formulação empírica.

Tabela 13: Evaporação mensal do reservatório da UHE de Camargos estimada pelo método de Linacre

Mês	Evaporação Mensal (mm/mês)			
	2010	2011	2012	Média
Janeiro	88	105	110	101
Fevereiro	98	122	92	104
Março	104	91	106	100
Abril	102	106	105	105
Maio	89	91	88	89
Junho	79	80	84	81
Julho	81	84	91	85
Agosto	118	124	106	116
Setembro	103	99	108	103
Outubro	112	87	139	113
Novembro	106	111	96	104
Dezembro	124	112	137	124
Total	1203	1211	1261	1225

Na Figura 24 apresenta-se a evaporação mensal do reservatório da UHE de Camargos, para o período de 2010 a 2012, enquanto na Figura 25 ilustram-se as médias mensais obtidas com o método de Linacre.

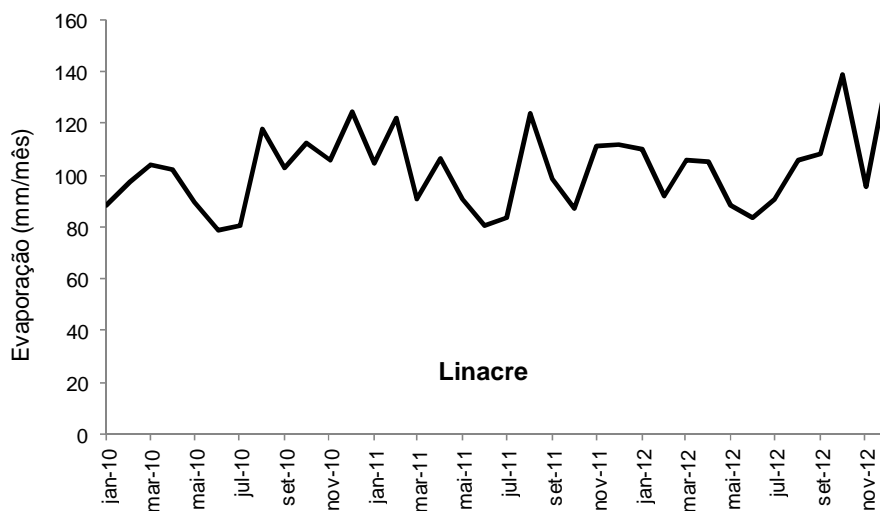


Figura 24: Evaporação mensal do reservatório da UHE de Camargos para o período de 2010 a 2012, obtida pelo Método de Linacre.

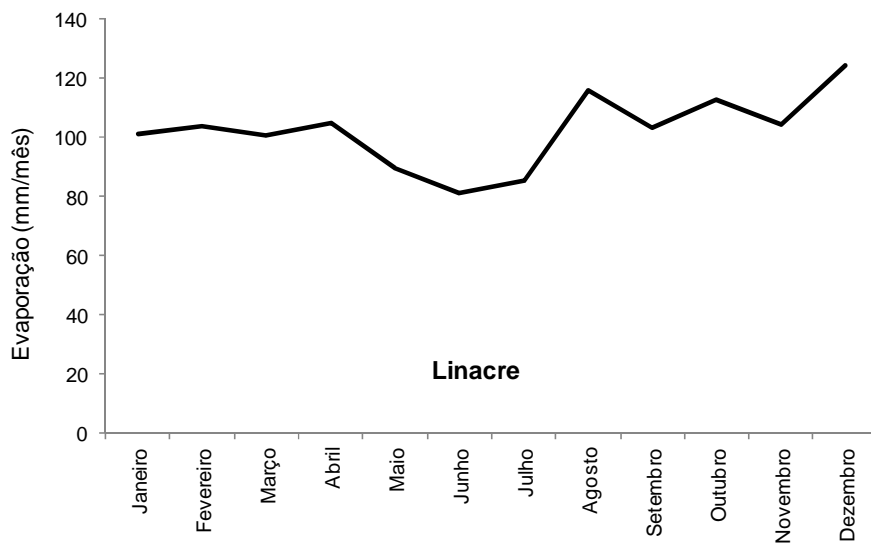


Figura 25: Evaporação mensal do reservatório da UHE de Camargos obtida pelo Método de Linacre

A taxa mínima está muito bem definida em fase com o mês de menor temperatura do ar (Junho), variável explicativa do método de Linacre.

Os maiores valores de evaporação são observados em diferentes épocas, com destaque para a taxa máxima de 124 mm/mês no mês de Dezembro, quando a temperatura média do ar foi a segunda maior do ano. O método de Linacre não considera a radiação solar na sua equação, o que explica ele subestimar a evaporação em Fevereiro, em comparação aos demais métodos.

4.2.3 Método de Penman

A Tabela 14 apresenta a evaporação estimada pelo método de Penman, cujos valores seguem um padrão de distribuição bem definido pelas variáveis meteorológicas consideradas na sua equação.

A Figura 26 apresenta a evaporação mensal do reservatório de Camargos para o período de 2010 a 2012, enquanto a Figura 27 ilustra as médias mensais obtidas com este método.

As taxas mínimas de evaporação foram estimadas para Junho e Julho, quando a temperatura do ar, radiação solar e velocidade do vento são menores; e a umidade relativa do ar é mais elevada.

As taxas máximas de evaporação foram estimadas para os meses de Fevereiro e Dezembro, por causa de maiores médias de temperatura do ar e radiação solar; e para o mês de Outubro, em virtude de uma combinação de fatores meteorológicos observados, especificamente, no mês de Outubro de 2012, que elevaram a média deste mês para o período de 2010 a 2012.

De acordo com os valores medidos na estação Marcela, o mês de Outubro de 2012 apresentou um dos maiores valores médio mensais de velocidade do vento (Tabela 9) e radiação solar (Tabela 10), além da segunda menor média de umidade do ar (Tabela 8) para o período estudado.

Tabela 14: Evaporação mensal do reservatório da UHE de Camargos estimada pelo método de Penman

Mês	Evaporação Mensal (mm/mês)			
	2010	2011	2012	Média
Janeiro	107	107	138	117
Fevereiro	120	134	111	121
Março	113	87	120	107
Abril	104	93	100	99
Maió	76	69	76	74
Junho	65	57	62	61
Julho	65	60	76	67
Agosto	103	96	118	105
Setembro	99	99	112	103
Outubro	129	88	169	129
Novembro	114	117	126	119
Dezembro	145	119	167	144
Total	1240	1126	1373	1246

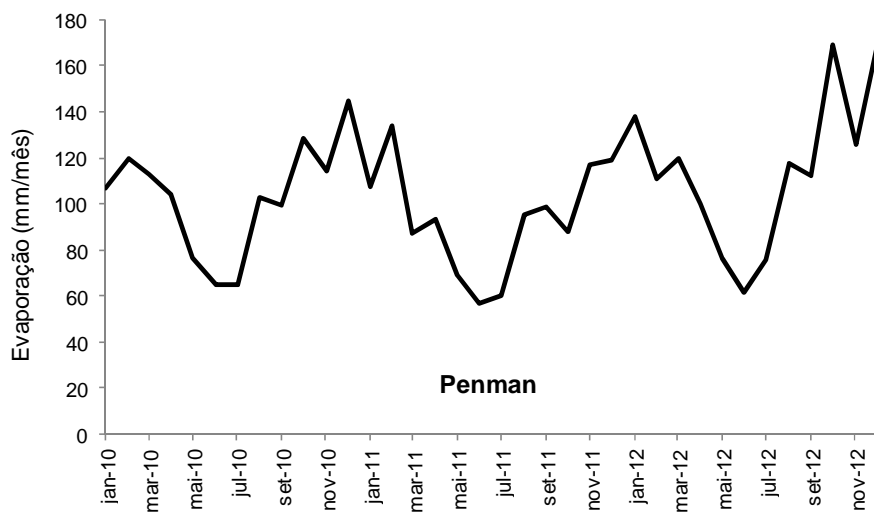


Figura 26: Evaporação mensal do reservatório da UHE de Camargos para o período de 2010 a 2012, obtida pelo Método de Penman

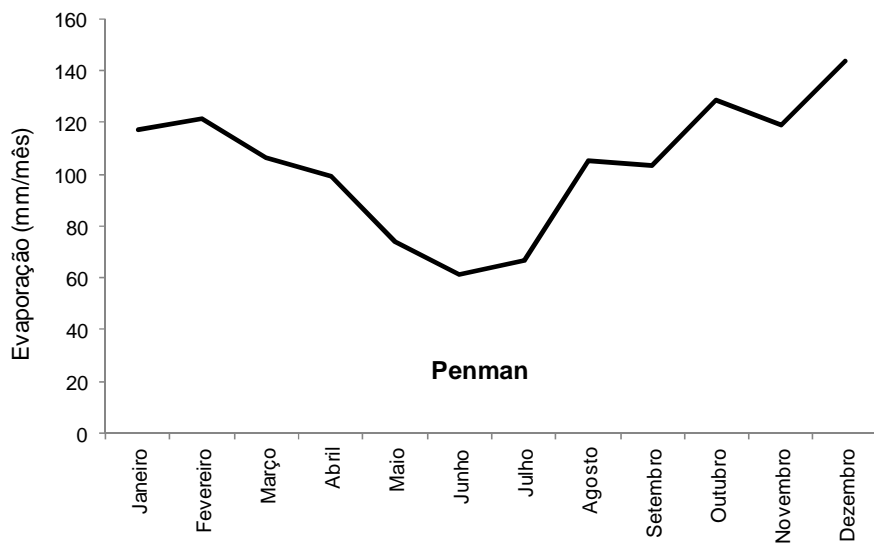


Figura 27: Evaporação mensal do reservatório da UHE de Camargos obtida pelo Método de Penman

4.2.4 Método de Penman-Monteith

Na Tabela 15 apresenta-se a evaporação estimada com o algoritmo proposto por McJannet et al. (2008) para o método de Penman-Monteith.

Na Figura 28 apresenta-se a evaporação mensal do reservatório da UHE de Camargos, para o período de 2010 a 2012, enquanto na Figura 29 ilustram-se as médias mensais obtidas com o método de Penman-Monteith.

Tabela 15: Evaporação mensal do reservatório da UHE de Camargos estimada pelo método de Penman-Monteith

Mês	Evaporação Mensal (mm/mês)			
	2010	2011	2012	Média
Janeiro	73	90	160	108
Fevereiro	106	141	99	115
Março	127	112	122	120
Abril	136	99	116	117
Maio	110	95	112	106
Junho	90	78	66	78
Julho	61	67	85	71
Agosto	98	85	109	97
Setembro	85	101	86	91
Outubro	115	86	124	108
Novembro	102	105	127	111
Dezembro	121	96	133	117
Total	1223	1155	1341	1240

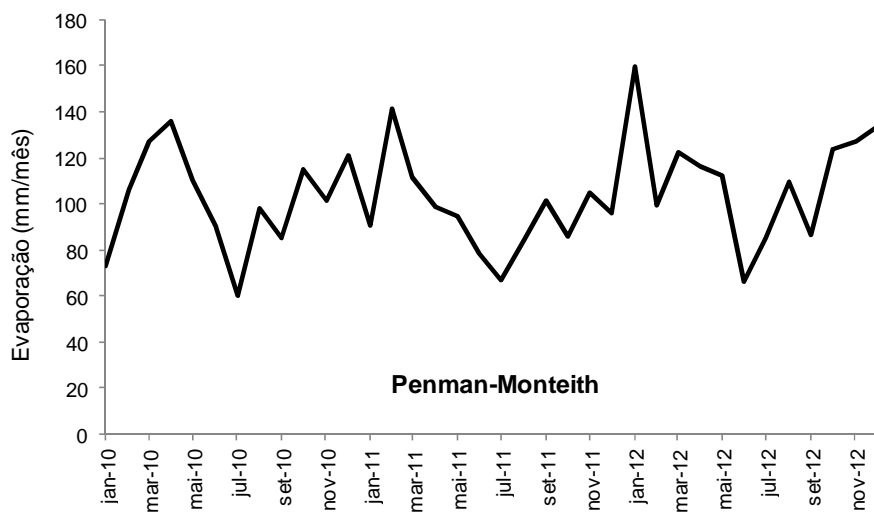


Figura 28: Evaporação mensal do reservatório da UHE de Camargos para o período de 2010 a 2012, obtida pelo Método de Penman-Monteith

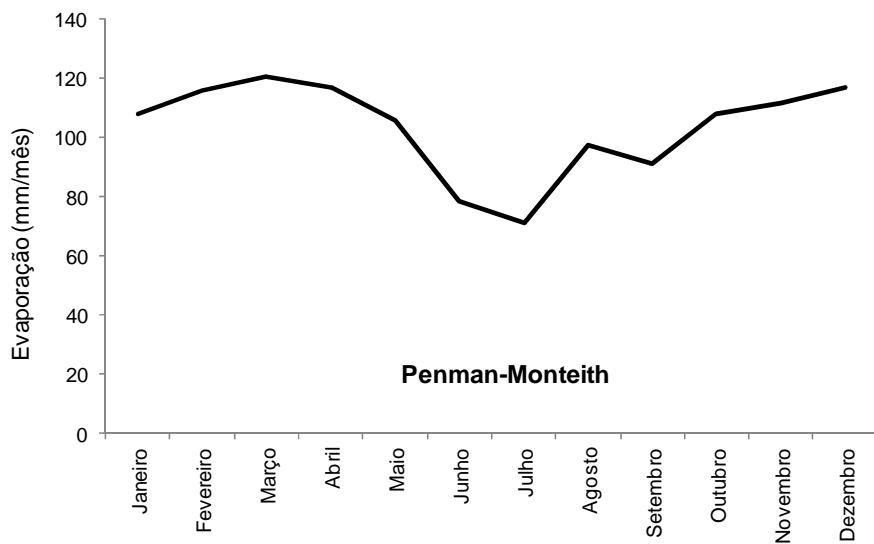


Figura 29: Evaporação mensal do reservatório da UHE de Camargos obtida pelo Método de Penman-Monteith

As taxas de evaporação estimadas pelo método de Penman-Monteith apresentam uma distribuição mensal semelhante aos valores resultantes do método de Penman, com valores máximos no verão e mínimos no inverno, respondendo bem a periodicidade das variáveis meteorológicas importantes para o processo de evaporação.

O método de Penman-Monteith indicou Março como o mês de maior evaporação, explicado pelos valores elevados de temperatura do ar e radiação solar; e Julho como o mês de taxa de evaporação mínima, em função das leituras menores de temperaturas do ar, radiação solar e velocidade do vento, em combinação com uma alta umidade relativa do ar.

Um detalhe que chama a atenção na Figura 29, decorrente do método de Penman-Monteith considerar o armazenamento de calor no reservatório, é o fato das estimativas extremas de evaporação estarem defasadas (em torno de um mês) em relação aos meses de ocorrência dos valores extremos da radiação solar (Figura 16).

Por exemplo, o pico da radiação solar foi observado no mês de Fevereiro, enquanto o máximo de evaporação estimada pelo método de Penman-Monteith correspondeu ao mês de Março. De forma semelhante, os menores valores de radiação solar foram medidos no mês de Junho, ao passo que as menores taxas de evaporação foram estimadas para o mês de Julho.

4.2.5 Evaporação do ONS

A evaporação adotada pelo Operador Nacional do Sistema - ONS é apresentada na Tabela 16.

Na Figura 30 ilustram-se as médias mensais de evaporação do reservatório da UHE de Camargos obtidas pelo Programa SisEvapo v2.0 (com base nas Normais Climatológicas 1961-1990).

Tabela 16: Evaporação mensal do reservatório da UHE de Camargos estimada pelo Programa SisEvapo v2.0 (a partir das Normais Climatológicas 1961-1990)

Mês	Evaporação Mensal (mm/mês)
Janeiro	128
Fevereiro	141
Março	128
Abril	113
Maio	92
Junho	81
Julho	82
Agosto	97
Setembro	117
Outubro	124
Novembro	138
Dezembro	141
Total	1382

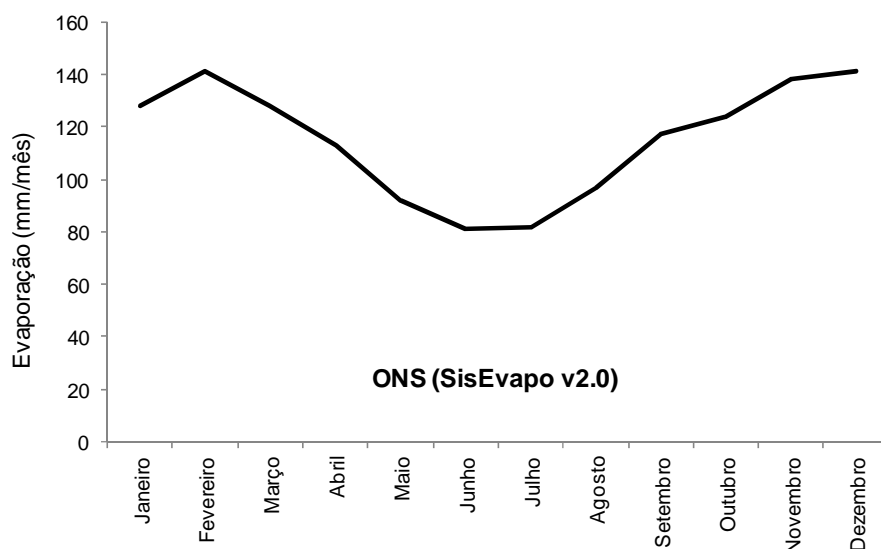


Figura 30: Evaporação mensal do reservatório da UHE de Camargos obtida pelo Programa SisEvapo v2.0 (a partir das Normais Climatológicas 1961-1990)

Os resultados mostram um padrão de distribuição da evaporação bem definido pelas variáveis meteorológicas consideradas pelo Programa SisEvapo v2.0 do ONS, com as taxas máximas estimadas para os meses de Fevereiro e Dezembro (temperatura do ar e radiação solar elevadas) e as taxas mínimas de evaporação estimadas para Junho e Julho (com temperatura do ar, radiação solar e velocidade do vento menores; além de uma maior umidade relativa do ar).

4.3 Evaporação Média Anual

A Tabela 17 apresenta as evaporações anuais do reservatório da UHE de Camargos, obtidas pelos métodos do Tanque Classe A, Linacre, Penman e Penman-Monteith; além da evaporação média anual adotada pelo ONS. A Figura 31 compara os volumes anuais de evaporação.

Tabela 17: Evaporações anuais do reservatório da UHE de Camargos para os anos de 2010 a 2012, obtidas pelos métodos do Tanque Classe A, Linacre, Penman, Penman-Monteith e ONS (Programa SisEvapo v2.0 com as Normais Climatológicas 1961-1990)

Ano	Evaporação Média Anual (mm/ano)				
	Tanque Classe A	Linacre	Penman	Penman-Monteith	ONS
2010	1415	1203	1240	1223	
2011	1351	1211	1126	1155	
2012	1422	1261	1373	1341	
Média	1396	1225	1246	1240	1382

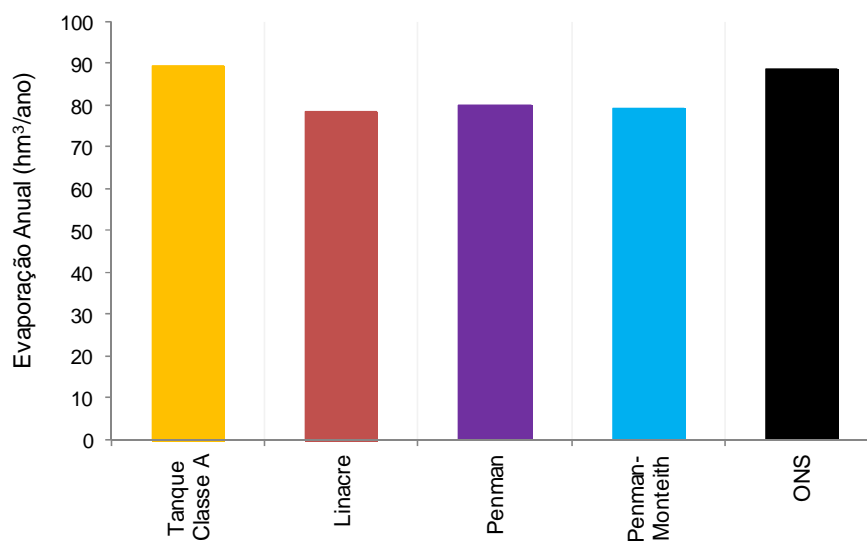


Figura 31: Volume anual de evaporação do reservatório da UHE de Camargos estimado pelos métodos do Tanque Classe A, Linacre, Penman, Penman-Monteith e ONS

A evaporação anual de 2012 foi a maior do período estudado, em todas as metodologias avaliadas. Este resultado foi em função dos valores elevados de radiação solar, temperatura do ar e velocidade do vento, observados neste ano na estação meteorológica Marcela, associados aos menores registros de umidade relativa do ar.

O método do Tanque Classe A apresentou as maiores estimativas de evaporação anual para os anos de 2010 a 2012 em comparação aos demais métodos avaliados. Desta forma, a taxa média anual de perda de água por evaporação, obtida com este método, foi superior aos demais.

O método de Linacre apresentou as menores estimativas de evaporação anual, justificado por não considerar a radiação solar na sua equação.

4.4 Considerações sobre os métodos de Penman e Penman-Monteith

De acordo com a Figura 32, o método de Penman, em relação ao método de Penman-Monteith, subestima a evaporação do reservatório da UHE de Camargos no período de Março a Julho, e superestima este processo de Agosto a Fevereiro.

Apesar de uma diferença pequena (menor que 1%) na evaporação média anual, em termos de taxas mensais, as diferenças foram expressivas, chegando a valores de -30% (no mês de Maio) e 23% (em Dezembro).

Um aspecto que influencia na estimativa da evaporação, especialmente na magnitude dos valores estimados, refere-se à temperatura da água. Assim, uma primeira justificativa da diferença de resultados entre os métodos de Penman e Penman-Monteith está, diretamente, associada à forma com que estes consideram a temperatura da superfície do reservatório, variável que afeta fortemente a estimativa da emissão de radiação de ondas longas, ou seja, o balanço de energia.

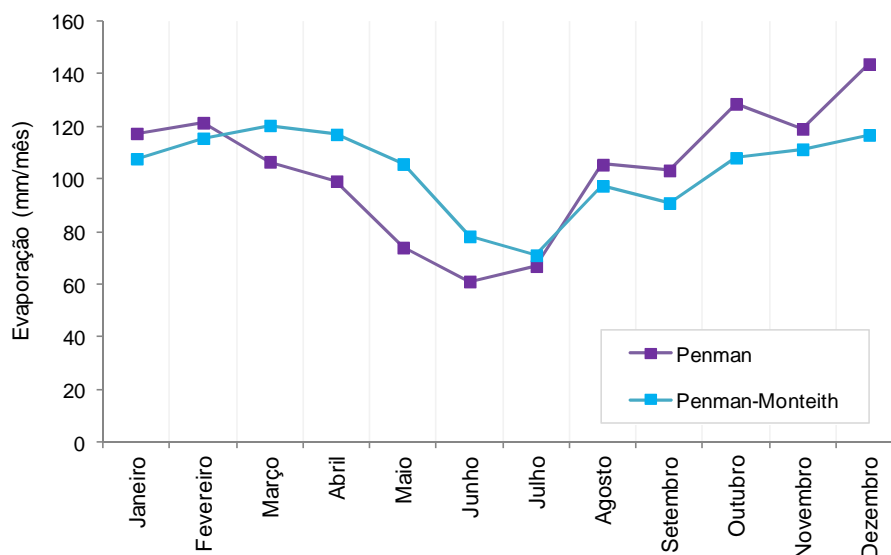


Figura 32: Evaporações mensais do reservatório da UHE de Camargos estimadas pelos métodos de Penman e Penman-Monteith

Enquanto o método de Penman-Monteith estima a temperatura da água (T_w) a partir da temperatura de equilíbrio, o método de Penman, simplesmente, considera T_w igual à temperatura do ar.

Nos meses em que a temperatura da água estimada pelo método de Penman-Monteith foi maior do que a temperatura do ar observada na estação meteorológica Marcela, o saldo de radiação disponível para evaporação foi menor e, conseqüentemente, os valores estimados deste processo foram inferiores àqueles obtidos pelo método de Penman. Por outro lado, quando a temperatura do ar medida foi maior do que a temperatura da água estimada, o método de Penman apresentou um menor saldo de radiação e, assim, os valores estimados de evaporação foram menores do que de Penman-Monteith. Este resultado condiz com o comportamento observado em estudos de evaporação elaborados por Dias e Kan (2008) e Reis e Dias (1998).

Na Figura 33 mostra-se que a temperatura da água estimada pelo método de Penman-Monteith, baseado na temperatura de equilíbrio, apresentou um padrão de distribuição sazonal igual ao da temperatura do ar, com valores mínimos no inverno (Junho / Julho) e máximos no verão (Janeiro / Fevereiro).

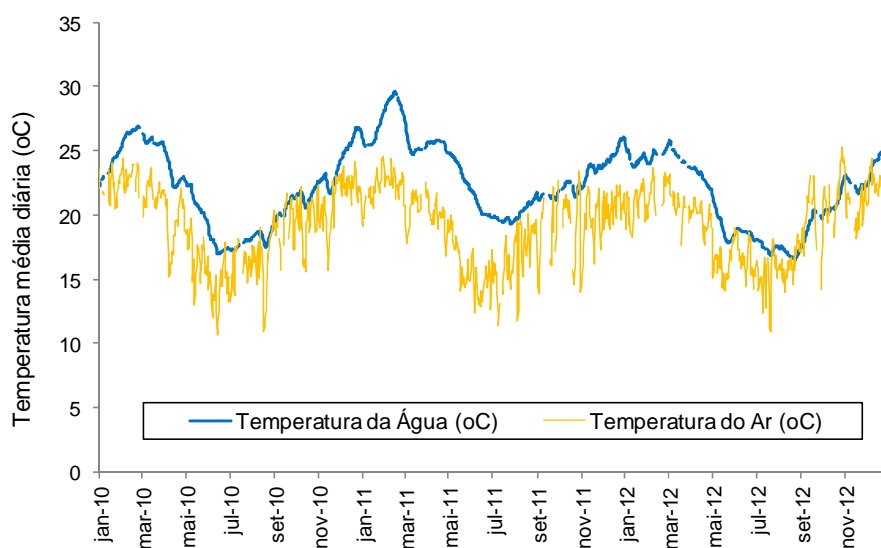


Figura 33: Temperatura do ar observada na estação Marcela e temperatura da água do reservatório da UHE de Camargos obtida pelo método Penman-Monteith

Neste caso, como não foram realizadas medidas em campo da temperatura da superfície do reservatório, não há como afirmar se os valores estimados a partir da temperatura de equilíbrio estão coerentes em relação à temperatura real da água ou se estão subestimados, conforme conclusões de outros estudos comentados no referencial teórico que monitoram T_w (DIAS; KAN, 2008; MCJANNET et al., 2008). Os resultados ilustrados na Figura 33 possibilitam apenas constatar que a temperatura da água estimada foi, sistematicamente, com poucas exceções (Setembro e Outubro de 2012),

ligeiramente, maior do que a temperatura do ar (em média 3°C acima), padrão condizente com os resultados de pesquisas que monitoraram, simultaneamente, estas variáveis (DIAS; KAN, 2008; LENTERS; KRATZ; BOWSER, 2005).

Observa-se, também, que a temperatura da água estimada apresenta oscilações bem mais atenuadas do que a temperatura do ar medida, em função da sua maior capacidade térmica. Angelocci e Villa Nova (1995) observaram comportamento semelhante em um reservatório na cidade de Piracicaba - SP.

Diante do exposto, pode-se concluir, a respeito das diferenças dos métodos de Penman e Penman-Monteith, que o primeiro estaria subestimando a temperatura da água ao considerá-la igual a do ar; implicando em uma menor emissão da radiação de ondas longas pelo corpo d'água e, conseqüentemente, um saldo maior de energia disponível para o processo de evaporação, superestimando, assim, o seu valor em relação ao estimado por Penman-Monteith.

Além da questão da influência da temperatura da água na estimativa da evaporação do reservatório, um outro aspecto de maior impacto nos resultados dos métodos de estimativa refere-se ao armazenamento de calor no corpo d'água.

A importância de se levar em conta o componente de armazenamento de calor do balanço de energia ficou bem evidente pela comparação dos resultados obtidos com o método de Penman-Monteith (que considera este processo) e com o método de Penman (com o armazenamento de calor admitido igual a zero).

Os valores apresentados na Tabela 17 indicaram que desprezar o efeito de variação de armazenamento de calor no corpo d'água resulta em uma diferença inferior à 1% na evaporação média anual do reservatório da UHE de Camargos estimada pelos métodos de Penman e Penman-Monteith. No entanto, na escala mensal, os valores de evaporação resultantes das metodologias em questão apresentaram diferenças de até 30%, decorrentes da energia armazenada no corpo de água que é liberada um certo período depois (considerada no

método de Penman-Monteith) e, conforme já comentado, do saldo de radiação maior ao considerar que a temperatura da água é igual à temperatura do ar (no método de Penman).

As evaporações estimadas pelo método de Penman-Monteith foram maiores do que as taxas obtidas com o método de Penman no período de Março a Julho, quando a parcela G (variação de calor armazenado no reservatório) da equação 23 foi negativa, ou seja, o corpo d'água perdeu energia para a atmosfera na forma de evaporação e de fluxo de calor sensível. Neste caso, a maior diferença de evaporação entre os métodos foi observada no mês de Maio, que apresentou a menor média da parcela G ($-106 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{dia}$), ou seja, o máximo de energia liberada pelo reservatório.

Por outro lado, os valores positivos de G (acúmulo de calor no corpo d'água) estimados pelo método de Penman-Monteith foram para os meses de Agosto a Fevereiro (com pico em Dezembro, igual a $+86 \text{ MJ/m}^2 \cdot \text{dia}$), resultando em um saldo menor de radiação e, conseqüentemente, menores taxas de evaporação nestes meses comparadas com os valores obtidos pelo método de Penman, que despreza a parcela G no balanço de energia (equação 9).

As conclusões de Elsaywaf, Willems e Feyen (2010) e Finch (2002) em estudos de evaporação de reservatórios, localizados no sul do Egito e no sudeste da Inglaterra, respectivamente, corroboram com os resultados apresentados anteriormente.

4.5 Comparativo dos métodos de estimativa de evaporação

Na Tabela 18 apresentam-se as médias mensais de evaporação do reservatório da UHE de Camargos, estimadas pelos métodos do Tanque Classe A, Linacre, Penman, Penman-Monteith e ONS (Programa SisEvapo v2.0 com as Normais Climatológicas 1961-1990).

Tabela 18: Evaporação média mensal do reservatório da UHE de Camargos, obtida pelos métodos do Tanque Classe A, Linacre, Penman, Penman-Monteith e ONS (Programa SisEvapo v2.0 com as Normais Climatológicas 1961-1990)

Mês	Evaporação Mensal (mm/mês)				
	Tanque Classe A	Linacre	Penman	Penman-Monteith	ONS
Janeiro	123	101	117	108	128
Fevereiro	129	104	121	115	141
Março	121	100	107	120	128
Abril	107	105	99	117	113
Mai	91	89	74	106	92
Junho	78	81	61	78	81
Julho	93	85	67	71	82
Agosto	129	116	105	97	97
Setembro	136	103	103	91	117
Outubro	137	113	129	108	124
Novembro	120	104	119	111	138
Dezembro	132	124	144	117	141
Total	1396	1225	1246	1240	1382

A distribuição da evaporação ao longo do ano apresentou padrão bem semelhante entre os métodos em questão, conforme ilustrado na Figura 34.

As maiores taxas foram estimadas para o período de Setembro à Março, com destaque para o mês de Fevereiro (quando são observados os maiores valores de radiação solar e temperatura do ar) e para o mês de Outubro (ventos mais fortes).

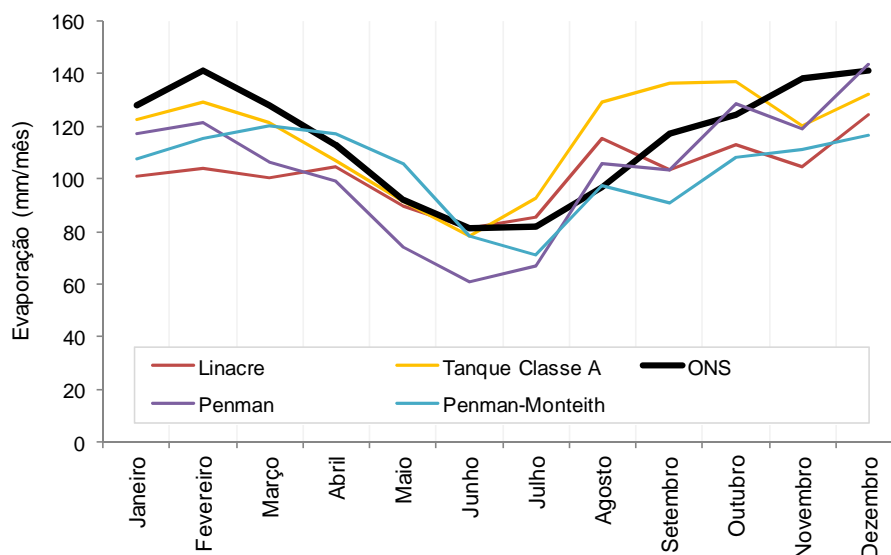


Figura 34: Evaporações médias mensais do reservatório da UHE de Camargos, obtidas pelos métodos do Tanque Classe A, Linacre, Penman, Penman-Monteith e ONS

Todos os métodos indicaram evaporação mensal mínima em Junho ou Julho, quando a temperatura do ar, a velocidade do vento e a radiação foram as mais baixas e a umidade relativa do ar apresentou os maiores valores do ano, para o período estudado (2010 a 2012).

O método de Penman indicou os valores mínimo e máximo de evaporação entre as metodologias estudadas, igual a 61 mm/mês (Junho) e 144 mm/mês (Dezembro), respectivamente. Isto se deve à simplificação do método de desconsiderar o armazenamento de calor no reservatório, o que resulta em uma superestimativa da evaporação no verão e uma subestimativa no inverno.

4.6 Desvios dos métodos em relação à evaporação adotada pelo ONS

Primeiramente, é importante ressaltar que não está sendo considerado como mais preciso e confiável os resultados do Programa SisEvapo v2.0. Simplesmente por se tratarem das taxas de evaporação adotadas pelo Operador Nacional do Sistema - ONS para o planejamento e gerenciamento do sistema elétrico brasileiro, optou-se em adotar os valores obtidos com o Programa SisEvapo v2.0 como referência para comparação com as demais metodologias estudadas.

Na Tabela 19 apresentam-se as diferenças (percentuais) entre as taxas mensais de evaporação do reservatório da UHE de Camargos estimadas pelos métodos estudados, em relação aos valores adotados pelo ONS.

Em termos de evaporação média anual, o método do Tanque Classe A apresentou a menor diferença (1%) em comparação aos 1382 mm/ano indicado pelo Programa SisEvapo v2.0 do ONS.

As demais metodologias, que fizeram uso das variáveis medidas na estação meteorológica Marcela, subestimaram igualmente (em cerca de -10%) a evaporação anual adotada pelo ONS para o reservatório da UHE de Camargos.

Nas figuras 35 a 38 apresentam-se, separadamente, os gráficos comparativos das evaporações mensais do reservatório da UHE de Camargos adotadas pelo ONS e aquelas estimadas pelos métodos de Linacre, Tanque Classe A, Penman e Penman-Monteith.

Tabela 19: Diferenças entre as taxas mensais de evaporação do reservatório da UHE de Camargos estimadas pelos métodos estudados, em relação aos valores adotados pelo ONS (Programa SisEvapo v2.0 com Normais Climatológicas 1961-1990)

Mês	Desvio em relação aos valores do ONS (%)			
	Tanque Classe A	Linacre	Penman	Penman-Monteith
Janeiro	-4%	-21%	-8%	-16%
Fevereiro	-9%	-26%	-14%	-18%
Março	-5%	-22%	-17%	-6%
Abril	-5%	-8%	-12%	3%
Maiο	-1%	-3%	-20%	15%
Junho	-4%	0%	-25%	-3%
Julho	13%	4%	-18%	-13%
Agosto	33%	19%	9%	0%
Setembro	17%	-12%	-12%	-22%
Outubro	11%	-9%	4%	-13%
Novembro	-13%	-24%	-14%	-19%
Dezembro	-6%	-12%	2%	-17%
Média	1%	-11%	-10%	-10%

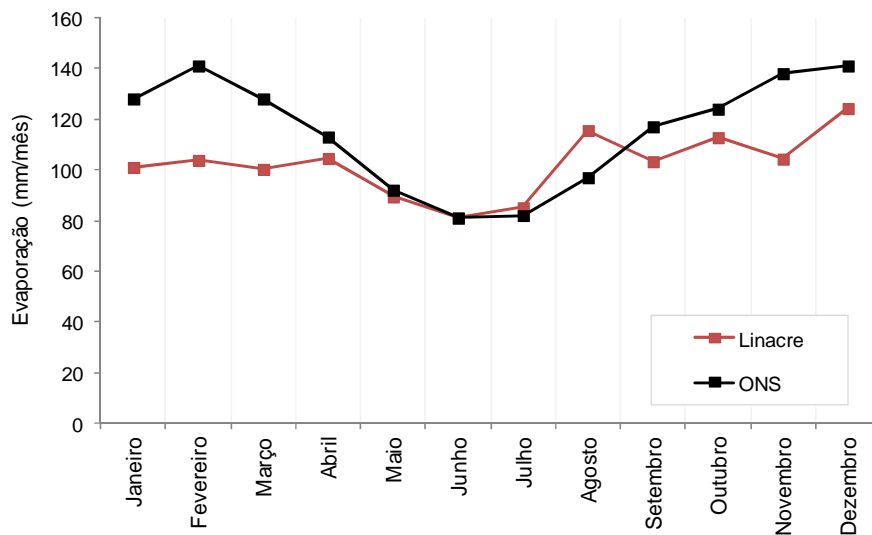


Figura 35: Evaporação mensal do reservatório da UHE de Camargos estimada pelos métodos de Linacre e do ONS (com Normais Climatológicas 1961-1990)

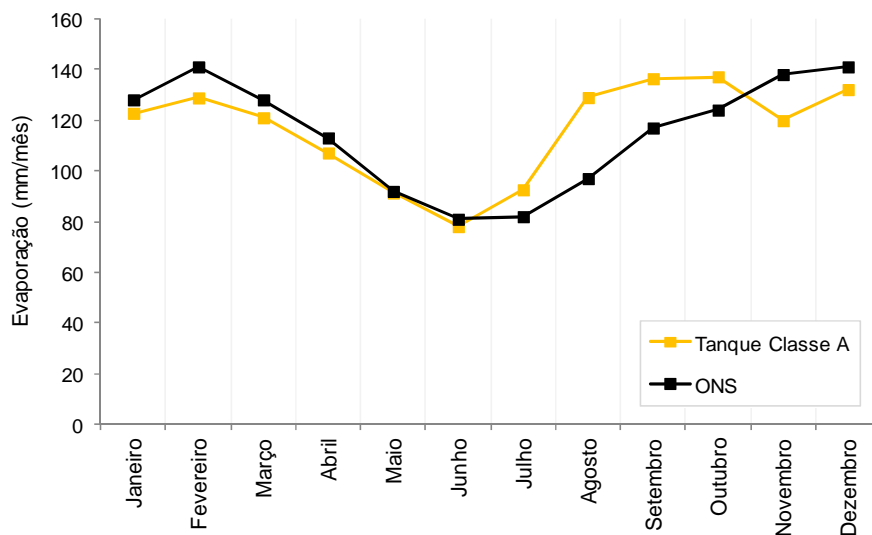


Figura 36: Evaporação mensal do reservatório da UHE de Camargos estimada pelos métodos do Tanque Classe A e do ONS (com Normais Climatológicas 1961-1990)

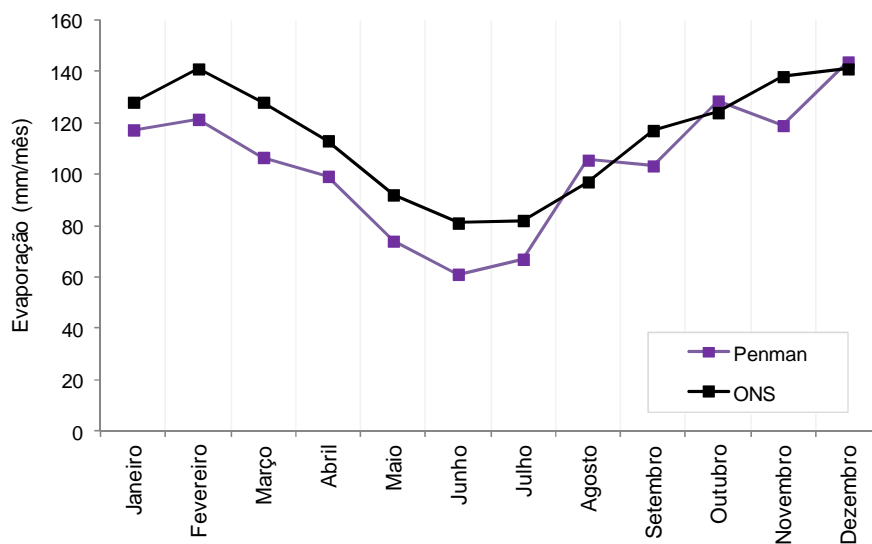


Figura 37: Evaporação mensal do reservatório da UHE de Camargos estimada pelos métodos de Penman e do ONS (com Normais Climatológicas 1961-1990)

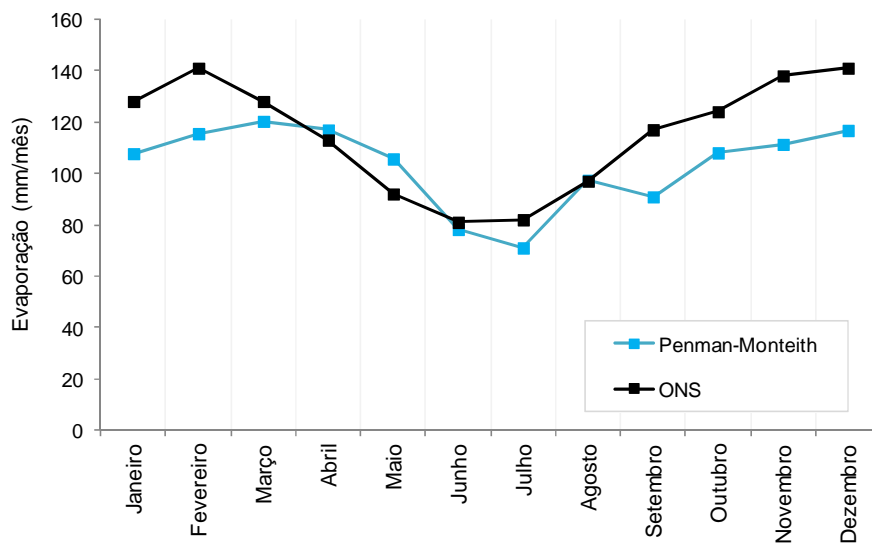


Figura 38: Evaporação mensal do reservatório da UHE de Camargos estimada pelos métodos de Penman-Monteith e do ONS (com Normais Climatológicas 1961-1990)

Apesar de diferenças, relativamente, pequenas na evaporação média anual, em termos de valores de evaporação mensal as diferenças foram expressivas, chegando a valores de -26% (no valor do mês de Fevereiro estimado pelo método de Linacre) a 33% (em Agosto, pelo método do Tanque Classe A).

Em geral, a maioria dos métodos apresentou valores de evaporações mensais menores do que o indicado pelo ONS (Programa SisEvapo v2.0), com diferença média de -7%. Da mesma forma, Dias e Kan (2008) e Reis, Dias e Batista (1997) concluíram que o modelo CRLE (que é a base do Programa SisEvapo v2.0) superestima a evaporação de reservatório em relação a outros métodos combinados de balanço de energia e transferência de massa.

As estimativas de evaporação do reservatório da UHE de Camargos a partir das leituras do Tanque Classe A apresentaram-se bem ajustadas ao gráfico resultante do Programa SisEvapo v2.0 para o período de Dezembro a Junho, com erro médio de -5% e uma boa aderência aos valores máximo (em Dezembro) e mínimo (em Junho). A partir de Julho, as estimativas são invertidas, com o método do Tanque Classe A superestimando as taxas mensais de evaporação indicadas pelo ONS, com uma maior diferença no mês de Agosto (+33%). Neste período, a variação de calor armazenado no reservatório é positiva, ou seja, o saldo de radiação é reduzido na estimativa do ONS (modelo CRLE). Entretanto, em função do seu pequeno volume, o Tanque Classe A não consegue representar este processo, majorando as estimativas de evaporação.

As evaporações mensais do método de Linacre apresentaram bom ajuste aos valores mínimos de evaporação obtidos pelo ONS, ou seja, nos meses de Maio a Julho. No período de Setembro a Março o método de Linacre subestima as taxas mensais de evaporação, com diferença maior (-26%) no mês de Fevereiro, em virtude deste método considerar apenas a temperatura do ar na sua equação empírica, ignorando o pico de radiação solar observado neste mês.

O método de Penman apresentou valores de evaporação menores do que estimado pelo ONS no período de Janeiro a Julho, com desvio maior (-25%) no mês de Junho, em decorrência da simplificação de não considerar a variação de calor armazenado no corpo d'água, conforme já explicado anteriormente. No período de Agosto a Dezembro, as taxas de evaporação mensais foram mais próximas aos resultados do ONS.

O método de Penman-Monteith apresentou bom ajuste aos valores de evaporações mensais indicadas pelo ONS no período de Março a Agosto, provavelmente, porque ambos os métodos simulam o processo de liberação de calor pelo reservatório neste período. Nos demais meses do ano (de Setembro a Fevereiro), o método de Penman-Monteith subestima bem os valores de evaporação preditos pelo ONS, com desvio médio de -18%.

Por fim, os desvios das taxas de evaporação estimadas, em relação ao método do ONS, podem ser explicados, também, pelas diferenças das variáveis climáticas usadas, tendo em vista que o período de dados considerado no Programa SisEvapo v2.0 (Normais Climatológicas 1961-1990) não foi o mesmo adotado para aplicação das demais metodologias estudadas (2010 a 2012).

4.7 Caracterização da Pegada Hídrica da UHE de Camargos

Considerando as estimativas de evaporação apresentadas anteriormente e dos valores de energia gerados no período de 2010 a 2012 (Tabela 4), foram realizados os cálculos da Pegada Hídrica da UHE de Camargos.

Na Tabela 20 apresentam-se os resultados da Pegada Hídrica Real da UHE de Camargos, estimadas com base nas evaporações obtidas pelos métodos do Tanque Classe A, Linacre, Penman, Penman-Monteith e ONS.

Tabela 20: Pegada Hídrica Real para geração de energia na UHE de Camargos

Mês	Energia Gerada (GJ/mês)	Pegada Hídrica Real (m ³ /GJ)				ONS
		Tanque Classe A	Linacre	Penman	Penman-Monteith	
Janeiro	75422	96	79	92	84	100
Fevereiro	52926	136	109	128	122	149
Março	68306	122	101	107	121	129
Abril	67972	114	111	105	124	120
Maiο	60713	109	107	89	127	110
Junho	57278	98	101	77	98	101
Julho	57807	113	103	81	86	100
Agosto	45016	194	174	159	147	146
Setembro	48523	178	134	134	118	152
Outubro	43468	183	150	172	144	166
Novembro	44126	157	137	156	146	181
Dezembro	57756	126	118	137	111	134
Média Anual	661263	136	119	121	121	135

Na Figura 39 ilustra-se a distribuição da Pegada Hídrica Real da UHE de Camargos ao longo do ano, resultante da combinação dos fatores climáticos (que influenciaram em taxas de evaporação maiores ou menores) com o padrão de geração de energia observado (que depende da demanda de mercado).

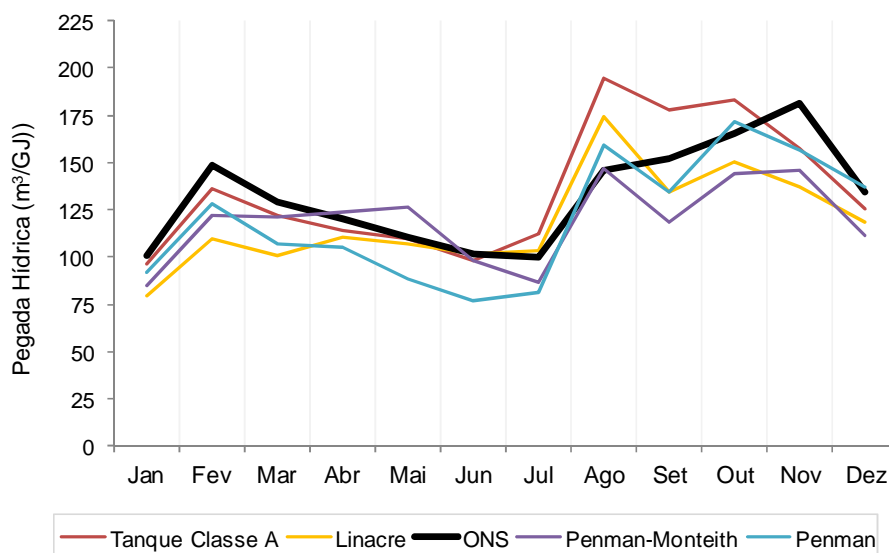


Figura 39: Pegada Hídrica Real da UHE de Camargos calculada a partir das taxas de evaporação estimadas pelos métodos do Tanque Classe A, Linacre, Penman, Penman-Monteith e ONS (Programa SisEvapo v2.0 com Normais Climatológicas 1961-1990)

Nos mês de Junho, em função de menores taxas de evaporação, a Pegada Hídrica calculada foi baixa, chegando ao valor mínimo mensal de $77 \text{ m}^3/\text{GJ}$ associado ao método de Penman. Entretanto, a predominância dos valores mais baixos foi observada no mês de Janeiro, caracterizado como o período de maior geração de energia pela UHE de Camargos, repercutindo, assim, em uma maior eficiência do uso da água, indicada por uma Pegada Hídrica mais baixa.

Os maiores valores de Pegada Hídrica foram observados no mês de Agosto para os métodos de Linacre, Penman-Monteith e Tanque Classe A, sendo que para este obteve-se o valor máximo mensal de $194 \text{ m}^3/\text{GJ}$. Para os métodos de Penman e ONS, as maiores Pegadas Hídricas foram calculadas para os meses de Outubro e Novembro, respectivamente, correspondente ao período de menor geração de energia pela UHE de Camargos.

Na Figura 40 apresenta-se um comparativo da Pegada Hídrica obtida para UHE de Camargos baseada na evaporação média anual estimada pelos métodos do Tanque Classe A, Linacre, Penman, Penman-Monteith e ONS.

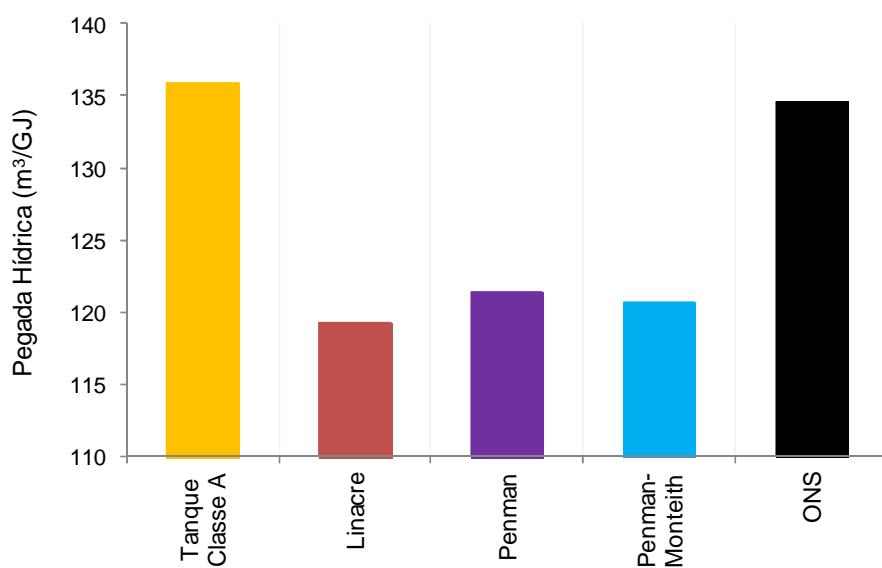


Figura 40: Pegada Hídrica Anual (Real) da UHE de Camargos calculada a partir de taxas de evaporação estimadas pelos métodos do Tanque Classe A, Linacre, Penman, Penman-Monteith e ONS (Programa SisEvapo v2.0 com Normais Climatológicas 1961-1990)

Os maiores valores de Pegada Hídrica encontrados para os métodos do ONS e Tanque Classe A foram decorrentes das taxas de evaporação superiores estimadas por estes métodos (Tabela 17). Os resultados associados aos métodos de Linacre, Penman e Penman-Monteith foram menores e próximos entre si.

5 CONCLUSÕES

Neste estudo foi estimada a evaporação do reservatório da UHE de Camargos e caracterizada a Pegada Hídrica desta hidrelétrica para o período de 2010 a 2012. As taxas de evaporação foram estimadas pelos métodos do Tanque Classe A (K_p igual a 0,80), Linacre, Penman, Penman-Monteith e ONS (Programa SisEvapo v2.0).

Por se tratarem das taxas de evaporação adotadas pelo ONS para o planejamento e gerenciamento do sistema elétrico brasileiro, optou-se em adotar os valores obtidos com o Programa SisEvapo v2.0 como referência para comparação com as demais metodologias estudadas. É importante ressaltar que, neste estudo, não foram considerados como mais precisos e confiáveis os resultados obtidos com o Programa SisEvapo v2.0 do ONS.

Todos os métodos apresentaram estimativas de evaporação diária próximas, com valor médio de 3,7 mm/dia e variação máxima de 0,4 mm/dia. Além disto, os métodos estudados apresentaram o mesmo padrão sazonal, com as taxas mínimas estimadas para os meses (Junho e Julho) em que foram observados os menores valores de temperatura do ar e radiação solar; e as taxas máximas de evaporação obtidas para os meses (Fevereiro e Setembro) caracterizados por maiores temperatura do ar e radiação solar. Em termos de evaporação anual, os métodos resultaram em um valor médio de 1298 mm/ano, com mínimo de 1225 mm/ano (método Linacre) e máximo de 1396 mm/ano (Tanque Classe A).

Em geral, a maioria dos métodos apresentou valores de evaporações menores do que o indicado pelo ONS (Programa SisEvapo v2.0), com diferença média de -7%, no intervalo mensal. Entre os fatores que influenciaram nestas diferenças a consideração ou não da variação de calor armazenado no reservatório pelos métodos estudados foi o mais importante.

Pela magnitude dos resultados obtidos neste estudo, é indiscutível que a UHE de Camargos é um grande consumidor de água, sobretudo quando comparado com outros usos dos recursos hídricos (abastecimento humano, irrigação, indústria).

A evaporação média anual obtida pelos métodos estudados equivale a uma retirada média de 2,6 m³/s de água do reservatório. No entanto, considerando a vazão regularizada pela UHE de Camargos, beneficiando usuários à jusante da barragem (inclusive outros aproveitamentos, como Itutinga, Funil e Furnas), este valor consumido por evaporação torna-se insignificante em relação ao impacto positivo proporcionado pela usina.

Segundo Brasil (2007a), a vazão regularizada pela UHE de Camargos com 100% de garantia é de 75,7 m³/s. Para o período de 2010 a 2012, a vazão média turbinada pela UHE de Camargos foi igual a 93,5 m³/s, sem contar as vazões vertidas durante o período de chuvas (CEMIG, 2013).

Para caracterização da Pegada Hídrica, o volume de água consumido foi considerado apenas como a perda por evaporação do reservatório, estimada pelas diferentes metodologias estudadas. Ressalta-se que, seguindo a metodologia de Mekonnen e Hoekstra (2011), não foi usada a evaporação líquida, ou seja, descontando o que já seria perdido por evapotranspiração real da área correspondente ao espelho d'água do reservatório.

A Pegada Hídrica da UHE de Camargos foi o resultado da combinação dos fatores climáticos (que influenciaram em taxas de evaporação maiores ou menores) com o padrão de geração de energia (que depende da demanda de mercado) observado no período estudado. Além disto, a Pegada Hídrica Real das hidrelétricas depende, fortemente, da sua geração efetiva, ou seja, da eficiência das turbinas.

No caso da UHE de Camargos, apesar de uma taxa de evaporação anual mediana e da pequena área do reservatório, por se tratar de um aproveitamento

antigo (mais de 50 anos), o seu rendimento é muito baixo; resultando, para todos os métodos, em uma Pegada Hídrica Real elevada (média de 126 m³/GJ), comparada à média global (68 m³/GJ) e nacional (86 m³/GJ) apresentada por Mekonnen e Hoekstra (2012).

Da mesma forma, a Pegada Hídrica Teórica da UHE de Camargos, quantificada baseada na potência instalada de 46 MW e na evaporação anual obtida com o Programa SisEvapo v2.0 do ONS (1382 mm/ano), resultou em um valor médio anual de 61 m³/GJ, bem superior à média global (39 m³/GJ), indicada por Mekonnen e Hoekstra (2012), mas próxima da média (68 m³/GJ) das usinas hidrelétricas localizadas no Brasil que integraram o estudo destes autores.

Por fim, ressalta-se que os resultados dos estudos reforçaram que o Tanque Classe A, equipamento simples e, relativamente, de baixo custo de aquisição e operação, continua sendo uma alternativa capaz de estimar a evaporação de reservatórios menores (como no caso da UHE de Camargos).

Além disto, as diferenças entre as taxas de evaporação estimadas pelos métodos estudados ressaltaram o melhor desempenho das metodologias que consideram a variação de calor armazenado no reservatório e, portanto, a importância do monitoramento da temperatura da água para um balanço de energia confiável.

Quanto a Pegada Hídrica, este indicador mostrou-se capaz de identificar o impacto do rendimento real das usinas na eficiência do uso dos recursos hídricos para geração de energia elétrica por hidrelétricas.

REFERÊNCIAS

- ABTEW, W. Evaporation estimation for lake okeechobee in South Florida. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 127, n. 3, p. 140-147, May/June 2001.
- ALLEN, R. G. et al. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Roma: FAO, 1998. (Irrigation and Drainage Paper, 56). Disponível em: <<http://www.fao.org/docrep/x0490e/x0490e00.htm>>. Acesso em: 10 abr. 2014.
- ALVAREZ, V. M. et al. A novel approach for estimating the pan coefficient of irrigation water reservoirs: application to South Eastern Spain. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 92, n. 1/2, p. 29-40, Aug. 2007.
- ANDRIOLO, M. V.; KAVISKI, E. **Projeto HG-211: revisão, atualização e aperfeiçoamento do sistema de avaliação líquida dos reservatórios do sistema interligado nacional: SisEvapo v2.0: relatório final**. Curitiba: CEHPAR, 2005. 71 p.
- ANGELOCCI, L. R.; VILLA NOVA, N. A. Variações da temperatura da água de um pequeno lago artificial ao longo de um ano em Piracicaba, SP. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 3, n. 52, p. 431-438, set./dez. 1995.
- ÁVILA, L. F. et al. Tendências de temperaturas mínimas e máximas do ar no Estado de Minas Gerais. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 49, n. 4, p. 247-256, abr. 2014.
- BERLATO, M. A.; MOLION, L. C. B. **Evaporação e evapotranspiração**. Porto Alegre: IPAGRO, 1981. 95 p. (Boletim Técnico, 7).
- BLANCO, F. F.; SENTELHAS, P. C. Coeficientes da equação de Angström-Prezcott para estimativa da insolação para Piracicaba, SP. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 10, n. 2, p. 295-300, 2002.
- BRASIL. Agência Nacional de Águas. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil**. Brasília, 2013. 432 p.
- BRASIL. Agência Nacional de Águas. **Disponibilidade e demandas de recursos hídricos no Brasil**. Brasília, 2007a. 118 p. (Cadernos de Recursos Hídricos, 2).

BRASIL. Agência Nacional de Águas. **A navegação interior e sua interface com o setor de recursos hídricos no Brasil e aproveitamento do potencial hidráulico para geração de energia no Brasil**. Brasília, 2007b. (Caderno de Recursos Hídricos, 3). Disponível em: <<http://arquivos.ana.gov.br/planejamento/estudos/sprtew/3/3-ANA.swf>>. Acesso em: 10 abr. 2014.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Matriz de energia elétrica**. Brasília, 2014. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/OperacaoCapacidadeBrasil.asp>>. Acesso em: 15 jul. 2014.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Recursos Hídricos. Agência Nacional de Águas. **Caderno da região hidrográfica do Paraná**. Brasília, 2006. 240 p.

BURBA, G. **Eddy covariance method for scientific, industrial, agricultural, and regulatory applications: a field book on measuring ecosystem gas exchange and areal emission rates**. Lincoln: LI-COR Biosciences, 2003. 331 p.

CANTARANI, R. et al. **Os riscos financeiros de empreendimentos hidrelétricos devidos à mudança climática**. 2009. 93 p. Monografia (MBA em Gestão Sócio Ambiental Aplicada a Energia Hidrelétrica) - Fundação Instituto de Administração, São Paulo, 2009.

CARVALHO, L. G.; DANTAS, A. A.; CASTRO NETO, P. **GNE 109: agrometeorologia**. Lavras: UFLA, 2010. 172 p.

CARVALHO, L. G. et al. Evapotranspiração de referência: uma abordagem atual de diferentes métodos de estimativa. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 41, n. 3, p. 456-465, jul./set. 2011.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia para engenharia e ciências ambientais**. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2013. 336 p.

COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS. **Dados operacionais e hidrológicos da UHE de Camargos: gerência de planejamento energético**. Belo Horizonte, 2013.

CURTARELLI, M. P. et al. Avaliação da dinâmica temporal da evaporação no reservatório de Itumbiara, GO, utilizando dados obtidos por sensoriamento remoto. **Revista Ambiente & Água**, Taubaté, v. 8, n. 1, p. 272-289, 2013.

DALTON, J. **Meteorological observations and essays**. 2^a ed. London: Baldwin & Cradock, 1834. 400 p.

DE BRUIN, H. A. R. Temperature and energy balance of a water reservoir determined from standard weather data of a land station. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 59, p. 261-274, 1982.

DIAS, N. L. et al. O Método de Covariâncias Turbulentas Atenuadas (MCTA) para medição dos fluxos de calor sensível e latente: aplicação ao lago de Itaipu e seu redor. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 7, n. 1, p. 143-160, jan./mar. 2002.

DIAS, N. L.; KAN, A. Evaporação líquida no reservatório de foz do areia, PR: estimativas dos modelos de relação complementar versus balanço hídrico sazonal e balanço de energia. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 13, n. 2, p. 31-43, abr./jun. 2008.

DIAS, N. L.; REIS, R. J. dos. Métodos de cálculo do balanço de entalpia em lagos e erros associados. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 3, n. 3, p. 45-55, jul./set. 1998.

DIAS, N. L.; ROCHA, L. S. Cálculo da taxa de variação da entalpia para os lagos de Itaipu e Foz do Areia. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 4, n. 3, p. 39-51, jul./set. 1999.

ELSAWWAF, M.; WILLEMS, P.; FEYEN, J. Assessment of the sensitivity and prediction uncertainty of evaporation models applied to Nasser Lake, Egypt. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 395, n. 1/2, p. 10-22, Dec. 2010.

ELVIRA, B. G. et al. Evaluation of evaporation estimation methods for a covered reservoir in a semi-arid climate: south-eastern Spain. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 458/459, p. 59-67, Aug. 2012.

FINCH, J. W. A comparison between measured and modelled open water evaporation from a reservoir in south-east England. **Hydrological Processes**, Chichester, v. 15, n. 14, p. 2771-2778, 2001.

FINCH, J. W.; GASH, J. H. C. Application of a simple finite difference model for estimating evaporation from open water. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 255, n. 1/2, p. 253-259, Jan. 2002.

FINANCIADORA DE ESTUDOS E PROJETOS. **Previsão de afluência a reservatórios hidrelétricos: módulo 1: projeto FAURGS/FINEP** 40.04.0094.00. Brasília, 2007. Disponível em: <http://www.ct.ufpb.br/~adrianorpaz/artigos/relatorio_final_dez07.pdf>. Acesso em: 10 maio 2014.

GERBENS-LEENES, P. W.; HOEKSTRA, A. Y.; MEER, T. H. van der. **Water footprint of bio-energy and other primary energy carriers**. Geneva: UNESCO-IHE, 2008. 44 p. (Value of Water Research Report Series, 29).

GERBENS-LEENES, P. W.; HOEKSTRA, A. Y.; MEER, T. H. van der. The water footprint of energy from biomass: a quantitative assessment and consequences of an increasing share of bio-energy in energy supply. **Ecological Economics**, Amsterdam, v. 4, n. 68, p. 1052-1060, 2009.

GIACOMONI, M. H.; MENDES, C. A. B. Estimativa de evapotranspiração regional por meio de técnicas de sensoriamento remoto integradas a modelo de balanço de energia. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 13, n. 4, p. 33-42, out./dez. 2008.

GOOGLE EARTH. Disponível em: <<http://earth.google.com/>>. Acesso em: 15 jul. 2014.

HOEKSTRA, A. Y. et al. **The water footprint assessment manual: setting the global standard**. London: Earthscan, 2011. 224 p.

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**, Amsterdam, v. 308, n. 1/4, p. 168-195, July 2005.

LINACRE, E. T. A simple formula for estimating evaporation rates in various climates, using temperature data alone. **Agricultural Meteorology**, Amsterdam, v. 18, p. 409-424, 1977.

MARCELINO, B. C. **Estimativas de evapotranspiração usando os modelos de Morton e de Penman**. Pelotas: UFPel, 1997. 5 p.

MASONER, J. R.; STANNARD, D. I.; CHRISTENSON, S. C. Differences in evaporation between a floating pan and a pan on land. **Journal of the American Water Resources Association**, Herndon, v. 44, n. 3, p. 552-561, June 2008.

MCJANNET, D. L. et al. **Estimating open water evaporation for the Murray-darling basin**: a report to the Australian government from the CSIRO Murray-Darling basin sustainable yields project. Melbourne: CSIRO, 2008. 58 p.

MEKONNEN, M. M.; HOEKSTRA, A. Y. The blue water footprint of electricity from hydropower. **Hydrology and Earth System Sciences**, Göttingen, v. 16, p. 179-187, Jan. 2012.

MEKONNEN, M. M.; HOEKSTRA, A. Y. **The water footprint of electricity from hydropower**. Delft: UNESCO-IHE; Institute for Water Education, 2011. 36 p. (Value of Water Research Report Series, 51).

MONTEITH, J. L. Evaporation and environment. **Water in Plant - Evaporation and Environment**, Dallas, v. 19, p. 205-235, 1965.

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

MORTON, F. I. Practical estimates of lake evaporation. **Journal of Climate and Applied Meteorology**, Boston, v. 25, p. 371-387, Mar. 1986.

MOTA, F. S. **Meteorologia agrícola**. São Paulo: Nobel, 1975. 376 p.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. Diretoria de Planejamento Programação da Operação. **Evaporações líquidas nas usinas hidrelétricas**: ONS RE 3/214/2004. Brasília, 2004. 61 p.

PENMAN, H. L. Evaporation in nature. **Reports on Progress in Physics**, Bristol, v. 11, n. 1, p. 366-388, 1947.

PENMAN, H. L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. **Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences**, London, v. 193, n. 1032, p. 120-145, Apr. 1948.

PEREIRA, S. B. et al. Evaporação líquida no lago de Sobradinho e impactos no escoamento devido à construção do reservatório. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, n. 3, p. 346-352, 2009.

PRIESTLEY, C. H. B.; TAYLOR, R. J. On the assessment of surface heat flux and evaporation using large-scale parameters. **Monthly Weather Review**, Boston, v. 100, n. 2, p. 81-92, Feb. 1972.

REIS, R. J. dos; DIAS, N. L. Multi-season lake evaporation: energy-budget estimates and CRL model assessment with limited meteorological observations. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 208, n. 3/4, p. 135-147, July 1998.

REIS, R. J. dos; DIAS, N. L.; BATISTA, M. Estimativa da evaporação do lago serra azul pelo método do balanço de energia-razão de Bowen. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 12., 1997, Vitória. **Anais...** Vitória: ABRH, 1997. 1 CD-ROM.

ROSENBERRY, D. O. Comparison of 15 evaporation methods applied to a small mountain lake in the northeastern USA. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 340, n. 3/4, p. 149-166, July 2007.

SENE, K. J.; GASH, J. H. C.; MCNEIL, D. D. Evaporation from a tropical lake: comparison of theory with direct measurements. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 127, n. 1/4, p. 193-217, Oct. 1991.

SIVAPRAGASAM, C. Modeling evaporation-seepage losses for reservoir water balance in semi-arid regions. **Water Resource Management**, Ann Arbor, v. 23, n. 5, p. 853-867, Mar. 2009.

STANNARD, D. I.; ROSENBERRY, D. O. A comparison of short-term measurements of lake evaporation using eddy correlation and energy budget methods. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 122, n. 1/4, p. 15-22, Jan. 1991.

TANNY, J. et al. Evaporation from a reservoir with fluctuating water level: correcting for limited fetch. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 404, n. 3/4, p. 146-156, July 2011.

TANNY, J. et al. Evaporation from a small water reservoir: direct measurements and estimates. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, v. 351, n. 1/2, p. 218-229, Mar. 2008.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 3. ed. Porto Alegre: ABRH, 2004. 944 p.

VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R. **Meteorologia básica e aplicações**. Viçosa, MG: UFV, 2000. 448 p.

WINTER, T. C.; ROSEMBERRY, D. O.; STURROCK, A. M. Evaluation of 11 equations for determining evaporation for a small lake in North Central United States. **Water Resources Research**, Washington, v. 31, n. 4, p. 983-993, 1995.