

## XXV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS

### DIFERENÇA ENTRE MÉTODOS DE CÁLCULO GLOBAL E MODELAGEM 3D DE EVAPORAÇÃO DE LAGOS E RESERVATÓRIOS

*Betina Kleinschmidt Leal Santos<sup>1</sup>, Erika Mariellen Ferreira<sup>2</sup>, Rafael de Carvalho Bueno<sup>3</sup>, Camila Bergmann Goulart<sup>4</sup>, Cristovão Vicente Scapulatempo Fernandes<sup>5</sup> & Tobias Bleninger<sup>6</sup>*

**Resumo:** A evaporação é parte crucial do ciclo hidrológico e representa uma perda efetiva da água de reservatórios para a atmosfera, o que torna a sua determinação indispensável para uma gestão eficiente dos recursos hídricos. Existem diferentes formas de estimar taxas de evaporação de lagos e reservatórios, por exemplo, através de modelos baseados no balanço hídrico, equações empíricas, equações aerodinâmicas, balanço de energia e experimentalmente (tanques classe A). Um método amplamente utilizado para estimar evaporação em lagos é o de Penman (1948), que combina balanços de massa e de energia, utilizando apenas dados meteorológicos como variáveis de entrada. Modelos hidrodinâmicos também podem ser utilizados para esta finalidade, onde dados meteorológicos e características hidrodinâmicas são considerados no balanço de calor do corpo d'água modelado. Este trabalho visa analisar as diferenças entre os valores calculados de evaporação a partir do método de Penman (1948) e do modelo hidrodinâmico Delft3D. Os resultados mostraram que os métodos apresentam alta correlação (0,9) no volume anual de água evaporada, mas baixa correlação na escala diária (0,1). Isso pôde ser explicado por divergências no cálculo do déficit de pressão, que, por sua vez, está relacionado à temperatura superficial da água, pois, enquanto o modelo de Penman utiliza uma aproximação para a temperatura da água, o modelo Delft3D incorpora a hidrodinâmica do sistema e o transporte de calor para modelá-la. Portanto, estudos que utilizam a equação de Penman ou simplificações para estimar a taxa de evaporação diária devem levar em conta essas variações observadas.

**Palavras-Chave:** Evaporação, Método de Penman, Delft3D.

## INTRODUÇÃO

Reservatórios de água possibilitam um maior controle sobre o acesso e a disponibilidade de recursos hídricos necessários para diferentes finalidades, como abastecimento humano, irrigação e geração de energia. Tanto a quantidade quanto a qualidade da água estão relacionadas a diferentes fatores ambientais que precisam ser estudados para garantir que as demandas de água serão supridas (Lenters et al., 2005). Neste contexto, a evaporação em reservatórios constitui uma perda significativa de recursos e sua determinação é essencial para uma gestão hídrica eficiente.

O processo de evaporação é complexo, dada a existência de transferências simultâneas de massa e energia. No ciclo hidrológico, o provimento de energia para o sistema tem origem na radiação solar, onde parte da radiação infravermelha presente é absorvida pela atmosfera fazendo com que ocorra um aumento da temperatura do ar. Quanto maior a temperatura do ar, maior será a capacidade

1 ) Estudante de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Brasil, e-mail: [betinakleal@gmail.com](mailto:betinakleal@gmail.com)

2 ) Estudante de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Brasil, e-mail: [erikamariellen2011@gmail.com](mailto:erikamariellen2011@gmail.com)

3 ) Estudante de doutorado, Universidade Federal do Paraná e University of Koblenz-Landau, Germany, e-mail: [rafael.bueno@ufpr.br](mailto:rafael.bueno@ufpr.br)

4 ) Estudante de doutorado, Universidade Federal do Paraná, email: [camila.goulart@ufpr.br](mailto:camila.goulart@ufpr.br)

5 ) Professor, Departamento de Hidráulica e Saneamento, Universidade Federal do Paraná, Brasil, e-mail: [cris.dhs@ufpr.br](mailto:cris.dhs@ufpr.br)

6 ) Professor, Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Brasil, e-mail: [bleninger@ufpr.br](mailto:bleninger@ufpr.br)

do ar em reter vapor d'água, e conseqüentemente, a sua pressão de vapor será maior. Assim, a força motriz responsável por retirar o vapor d'água da superfície evaporante é o déficit de pressão de vapor d'água entre a superfície evaporante e a atmosfera envolvente (Chow, 1998). Conforme o processo de evaporação ocorre e o ar fica cada vez mais saturado de vapor d'água, o déficit de pressão de vapor diminui, reduzindo a taxa de evaporação. Por isso, para que a evaporação continue, é importante a ação dos ventos para substituir o ar úmido por ar mais seco (Pimentel, 2011). Portanto, as principais variáveis meteorológicas utilizadas para determinar a evaporação são: radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento.

Os primeiros métodos criados para estimar a evaporação a partir de variáveis meteorológicas tinham uma abordagem empírica, baseados principalmente na lei de Dalton (Dalton, 1802) que define que a taxa de evaporação é proporcional à intensidade do vento e à diferença de pressão de vapor entre a superfície evaporante (e.g. água) e a atmosfera circundante.

O método combinado de Penman (Penman, 1948) é um modelo que combina os efeitos aerodinâmicos com o balanço de energia, sendo amplamente utilizado para estimar a evaporação em lagos (McMahon *et al.*, 2013; Tanny *et al.*, 2007; Gallego-Elvira *et al.*, 2012). A parte aerodinâmica resulta da relação de Dalton e assume que a maior resistência à evaporação se dá por uma fina camada de ar acima da superfície evaporante, na qual o movimento do ar é não turbulento e a transferência do vapor d'água ocorre por difusão molecular (Penman, 1948). Já a parte de balanço energético considera a radiação extraterrestre de ondas curtas e a troca de radiação de ondas longas entre a superfície terrestre e a atmosfera, ou seja, o saldo de radiação. Além disso, outros fluxos de energia são considerados, como o calor latente e o calor sensível (Chow, 1988).

Uma desvantagem do método de Penman, quando usada para estimar a evaporação em lagos, é a ausência dos dados de temperatura da água. A temperatura da água é importante para o cálculo da pressão de vapor de saturação da superfície evaporante, que é calculada utilizando a temperatura do ar. Essa aproximação não é representativa, pois não necessariamente a superfície do lago terá a mesma temperatura que o ar circundante (Nichols *et al.*, 2004). Ademais, como a água possui uma maior capacidade térmica que o ar, corpos d'água profundos podem armazenar energia suficiente para continuar o processo de evaporação ainda que a temperatura da atmosfera esteja mais baixa (Hojjati *et al.*, 2020).

Os métodos supracitados geralmente são aplicados em escala global, isto é, no reservatório como um todo, não considerando variações espaciais dos parâmetros envolvidos. Estas variações espaciais, porém, podem ser significativas. Para espacializar as metodologias, modelos auxiliares podem ser usados (modelos atmosféricos e/ou hidrodinâmicos). Exemplos de resultados de modelos hidrodinâmicos são Rocha, 2023 ou HASSAN *et al.*, 2017. Estes muitas vezes possuem em suas formulações matemáticas modelos de transferência de calor que consideram uma estimativa do fluxo de calor por evaporação. O modelo Delft3D (Deltares, 2023) realiza o cálculo da taxa de evaporação através do déficit de pressão, seguindo a formulação baseada na lei de Dalton (Dalton, 1802). Embora sua formulação teórica seja semelhante ao descrito pelo método de Penman, a pressão de saturação de vapor é calculada diretamente com os dados da temperatura da água modelados, considerando assim, a influência da hidrodinâmica do corpo d'água e suas variabilidades espaciais e temporais no cálculo da evaporação. Nesse sentido, modelos hidrodinâmicos tridimensionais (e.g. Delft3D e o Estuary, Lake and Coastal Ocean Model) são ferramentas úteis não apenas para estudar a hidrodinâmica de sistemas estratificados, mas também para avaliar a distribuição espacial da evaporação.

Dada a complexidade do processo de evaporação e visto que modelos simplificados são comumente utilizados para estimar a taxa de evaporação em lagos (McMahon *et al.*, 2013), é razoável questionar a representação correta de tais modelos para a hidrodinâmica particular de reservatórios. É importante entender quais fatores físicos causam variações entre os métodos simplificados e os

modelos hidrodinâmicos tridimensionais. Neste contexto, o objetivo deste trabalho é avaliar as diferenças entre os valores calculados de evaporação pelo método de Penman (1948) e pelo modelo Delft3D, as razões físicas que justificam tais variações e, a partir disso, entender para quais finalidades os métodos são recomendados.

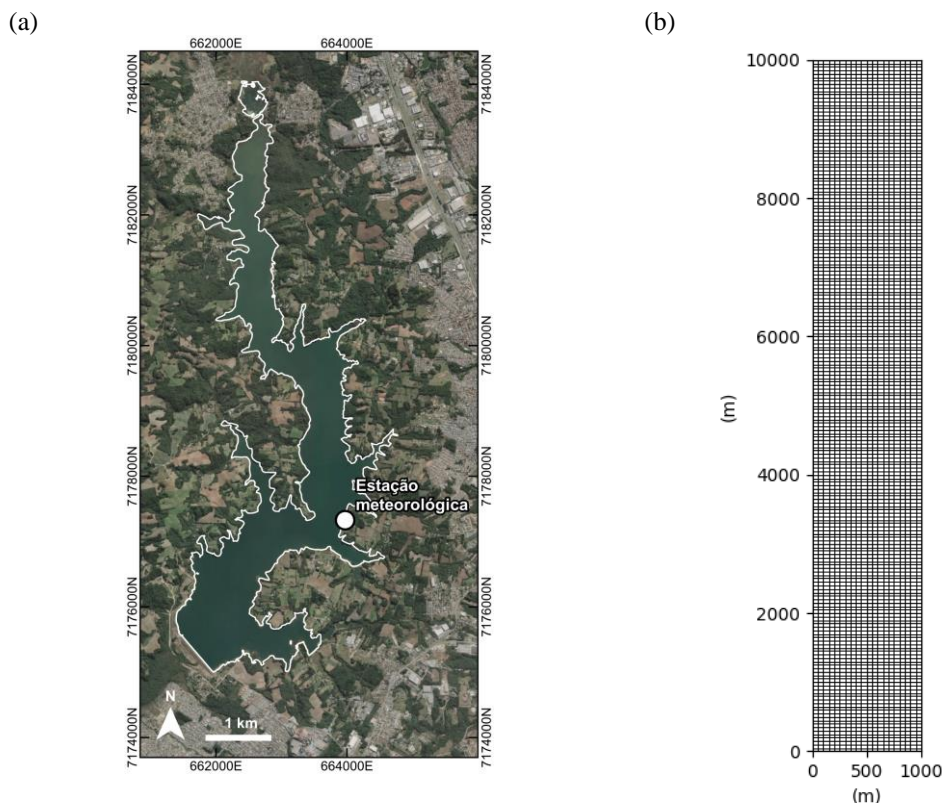
## MÉTODOS

### Área de Estudo

A área de estudo compreende o reservatório Passaúna, localizado na Região Metropolitana de Curitiba, capital do estado Paraná, Brasil (Figura 1). Ele possui área superficial de aproximadamente 9 km<sup>2</sup>, profundidade média de 8,3 m, profundidade máxima de 17,5 m e tempo de residência estimado em 292 dias (Marcon, 2019). O reservatório Passaúna foi construído pelo barramento do rio Passaúna em 1989, com objetivo de abastecimento público, sendo responsável atualmente por abastecer mais de 20% da população de Curitiba.

Dados meteorológicos, incluindo temperatura do ar, umidade relativa, radiação solar e velocidade do vento, foram coletados a cada minuto entre 1 de setembro de 2017 e 31 de agosto 2018 por uma estação meteorológica automática (Figura 1) localizada na margem do reservatório (35 m da lâmina d'água). A estação meteorológica (-49°22'7,902", -25°30'45,211") possui os seguintes sensores: sensor meteorológico 2 em 1 a prova d'água termo-higrômetro MeteoTemp RH+T, para temperatura do ar e umidade relativa (BARANI DESIGN, 2017a); anemômetro MeteoWind 2 wind sensor, para velocidade e direção do vento (BARANI DESIGN, 2017b), e piranômetro MS-80, para medição da radiação solar (EKO, 2020). O processamento e o tratamento dos dados foram computados em Python. Para a remoção de *outliers* identificados nas séries temporais dos dados meteorológicos, foi utilizado o método de intervalo interquartil (Tukey, 1977).

Figura 1 – Reservatório e grade numérica. a) Reservatório do Passaúna e localização da estação meteorológica. b) grade numérica e delimitações do reservatório prismático utilizado para a análise da hidrodinâmica e evaporação.



### Modelagem hidrodinâmica com o programa Delft3D:

Para a simulação hidrodinâmica com o modelo Delft3D, o reservatório do Passaúna foi inicialmente simplificado, para fins de testes, a um reservatório prismático (Figura 1b). Embora o modelo tenha sido desenvolvido com os dados meteorológicos do reservatório do Passaúna, com o objetivo de simplificar a hidrodinâmica, o cenário foi concebido desconsiderando rios, vertedouro, braços, meandros, batimetria e a morfologia do reservatório do Passaúna. O reservatório prismático teve suas dimensões definidas com base no reservatório real (Figura 1a) e possui 1 km de largura, 10 km de comprimento e 12 m de profundidade (Figura 1b). Uma grade reticulada foi construída com 4000 células de 50 x 50 m, apresentando 20 e 200 células, respectivamente, ao longo do eixo principal (10 km) e transversal (1 km) do reservatório. A profundidade foi dividida em 10 camadas de 1,2 m. Para garantir estabilidade e atender o critério mínimo de estabilidade de Courant-Friedrichs-Lewy, a solução numérica foi definida com passo temporal de um minuto. Para não sobrecarregar o processamento, os resultados foram obtidos com passo temporal de 10 minutos.

O modelo Delft3D foi ajustado para realizar o cálculo do fluxo de calor na superfície do reservatório através do modelo Ocean (Delates, 2023; Gill, 1982), que estima a taxa de evaporação através da lei de Dalton de transferência de massa levando em conta a temperatura superficial da água para cada célula de grade (Lane, 1989):

$$EoD(x, y, t) = c_e u_{10} (e_{sD} - e_{aD}), \quad (1)$$

em que  $c_e = 0,0015$  é o número de Dalton,  $u_{10}$  é a velocidade do vento a 10 m de altura (m/s),  $e_{sD}$  é a pressão de vapor saturado (mbar) e  $e_{aD}$  é a pressão de vapor (mbar), sendo as pressões definidas como:

$$e_{sD} = 10^{\frac{0,7859 + 0,03477T_{agua}}{1,0 + 0,00412T_{agua}}}, \quad (2)$$

$$e_{aD} = RH \cdot 10^{\frac{0,7859 + 0,03477T_{ar}}{1,0 + 0,00412T_{ar}}}, \quad (3)$$

em que  $T_{agua}$  é a temperatura superficial da água (°C),  $T_{ar}$  é a temperatura do ar (°C) e  $RH$  é a umidade relativa (%), sendo o déficit de pressão de vapor calculado como:

$$D_D = e_{sD} - e_{aD}. \quad (4)$$

A taxa volumétrica média de evaporação diária ( $EoD_v$ ), em  $hm^3/dia$ , do reservatório prismático simulado no Delft3D foi obtida considerando a taxa de evaporação (Equação 1) de cada célula da grade (Figura 1b):

$$EoD_v(t) = \int_0^L \int_0^B EoD(x, y, t) dy dx, \quad (5)$$

onde L é o comprimento e B a espessura do reservatório.

Uma vez que a simulação apresentou os resultados em um intervalo de tempo de 10 minutos, para a comparação com o método de Penman, também foi calculada a média diária através da série temporal da taxa volumétrica de evaporação (Equação 5).

### Cálculo da evaporação a partir de dados meteorológicos:

A taxa de evaporação diária ( $EoP$ ), em mm/d, também foi calculada utilizando o modelo de Penman (1948) a partir de dados da estação meteorológica (Figura 1), os mesmos utilizados para a simulação hidrodinâmica:



$$EoP = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{Rn}{\lambda} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \frac{6,43(1 + 0,536u_2)(e_{sP} - e_{aP})}{\lambda}, \quad (6)$$

em que  $\Delta$  é a declividade da curva de pressão de saturação (kPa/°C),  $\gamma$  é a constante psicrométrica (kPa/°C),  $Rn$  é o saldo de radiação (MJ/m<sup>2</sup>/d),  $\lambda$  é o calor latente de vaporização (MJ/Kg),  $e_{sP}$  é a pressão de saturação de vapor à temperatura do ar (kPa) e  $e_{aP}$  é a pressão de vapor atual (kPa) e  $u_2$  é a velocidade do vento medida a 2 metros de altura (m/s), conforme correção logarítmica com os dados de ventos medidos a 10 metros de altura (m/s):

$$u_2 = \frac{4,87u_{10}}{\log(672,58)}. \quad (7)$$

Para o cálculo da evaporação (Equação 6), as pressões de vapor de saturação ( $e_{sP}$ ) são avaliadas nos extremos de temperatura diária:

$$e_{sP} = \frac{e^o(T_{max}) + e^o(T_{min})}{2}, \quad (8)$$

em que  $T_{max}$  é a temperatura do ar máxima diária (°C) e  $T_{min}$  é a temperatura do ar mínima diária (°C), onde a pressão de vapor de saturação a uma temperatura  $T$  (°C) é definida como:

$$e^o(T) = 0,6108 \exp \left[ \frac{17,27T}{T + 237,3} \right]. \quad (9)$$

A pressão de vapor atual ( $e_{aP}$ ) é estimada a partir de:

$$e_{aP} = \frac{RH_{mean}}{100} e_{sP}. \quad (10)$$

Assim, o déficit de pressão de vapor calculado para o método de Penman é definido como:

$$D_P = e_{sP} - e_{aP}. \quad (11)$$

A taxa volumétrica de evaporação diária do reservatório ( $EoP_V$ ), em hm<sup>3</sup>/dia, foi calculada através da área superficial do reservatório. Assim, para ser condizente com a evaporação estimada através do modelo desenvolvido no Delft3D, a área superficial utilizada foi baseada na área do reservatório prismático ( $A = 10 \text{ km}^2$ ):

$$EoP_V = \frac{EoP \times A}{1000}. \quad (12)$$

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

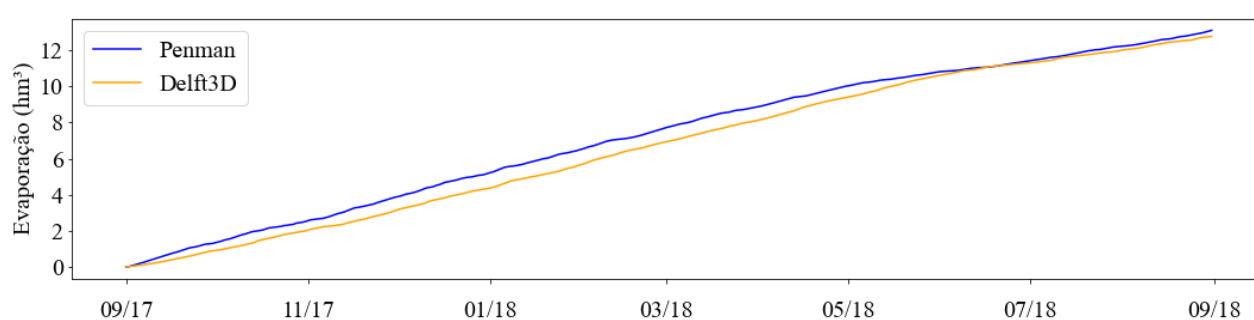
A soma acumulada da evaporação total calculada através do método de Penman (Equação 12) e obtidas através do modelo hidrodinâmico Delft3D (Equação 5) apresentam um aumento contínuo quase linear ao longo do período de observação, com um leve decaimento após o mês de junho de 2018, caracterizando uma redução da taxa de evaporação (Figura 2).

Nota-se que os volumes de água evaporada obtidos pelos dois métodos possuem uma alta correlação (0,9) e variabilidade de  $\pm 0,01 \text{ hm}^3$  ao longo do período estudado. Ao final de um ano, a equação de Penman estima  $13,08 \text{ hm}^3$  de água evaporada, enquanto o método do Delft3D,  $12,75 \text{ hm}^3$ . Assim, a diferença do volume de água evaporado ao longo de um ano entre os dois métodos é de  $0,33 \text{ hm}^3$ , valor inferior a 2,6% em relação à média do volume evaporado entre os dois modelos e 0,28% do volume total do reservatório. A perda volumétrica de água anual devido à evaporação é condizente

com estimativas realizadas em outros reservatórios com dimensões similares. Estimativas realizadas na barragem de Gargar (Algeria) observou evaporação entre 5 e 32 hm<sup>3</sup>/ano (Hassen e Abid, 2017)

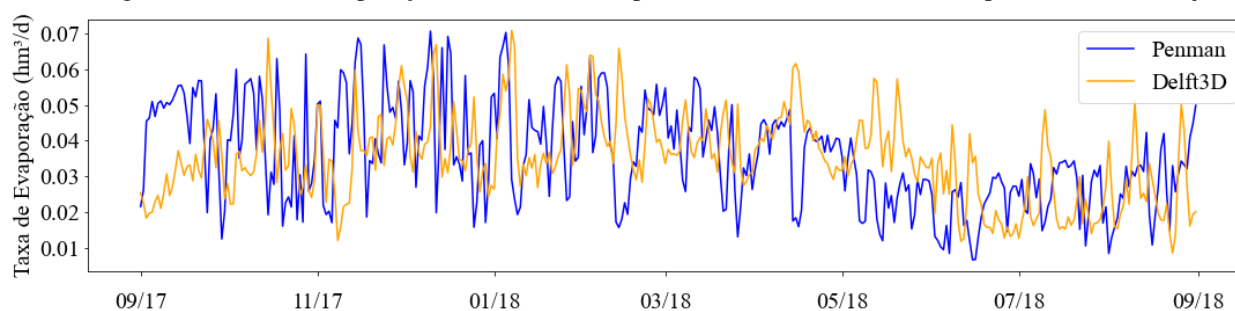
Diferente da soma acumulada de evaporação, em que não é perceptível grandes variabilidades entre os métodos, na análise da taxa de evaporação diária, é possível observar uma diferença muito mais significativa (Figura 3), onde em alguns momentos é perceptível um descompasso entre os métodos (e.g. Fevereiro e Abril de 2018). Ambos os métodos estimam que a taxa de evaporação diária ao longo do período estudado varia entre 0,007 hm<sup>3</sup>/dia e 0,071 hm<sup>3</sup>/dia (Figura 3). Embora uma grande variabilidade seja observada entre as taxas diárias de evaporação, a evaporação média é próxima, apresentando valores de 0,036 hm<sup>3</sup>/dia e 0,035 hm<sup>3</sup>/dia, estimados, respectivamente, pela equação de Penman e através do modelo do Delft3D.

Figura 2 – Série temporal das somas acumuladas de evaporação total, em hectômetros cúbicos, calculadas pelo método de Penman (azul) e pelo Delft3D (laranja).



Este resultado corrobora com estudos que avaliaram a média de evaporação diária para períodos de 14 dias, 1 mês e 1 ano completo, nos quais os modelos meteorológicos apresentam bons resultados em comparação com valores medidos de evaporação (Tanny *et al.*, 2007; Hojjati *et al.*, 2020). No entanto, embora os resultados acumulados ao longo de um ano e as médias de evaporação apresentem discrepâncias pequenas entre os modelos avaliados (Figura 2), ao comparar o comportamento ao longo do ano das taxas de evaporação diária (Figura 3), observa-se que os modelos apresentam comportamentos diferentes, possuindo baixa correlação (0,1).

Figura 3 – Taxas de evaporação diária calculadas pelo método de Penman (azul) e pelo Delft3D (laranja).



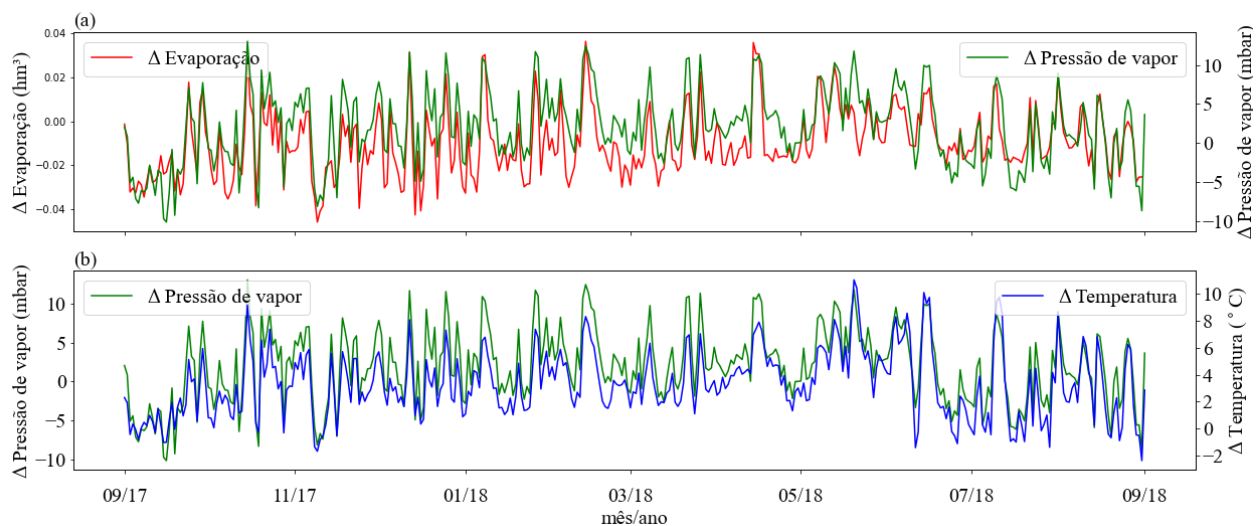
A variação entre os valores estimados de evaporação ocorre devido à diferença entre os valores do déficit de pressão calculados para cada método (Figura 4). O déficit de pressão de vapor é uma variável que exprime a diferença entre o vapor de pressão da superfície evaporante (neste caso, a água do reservatório) e o ar circundante. Enquanto o modelo de Penman utiliza somente dados meteorológicos e uma aproximação para a temperatura da água, modelos hidrodinâmicos utilizam diretamente os valores modelados da temperatura da água, incorporando todas as influências da hidrodinâmica do sistema e do transporte de calor.

Assim, há uma diferença entre os valores de déficit de pressão calculados para cada método, responsáveis diretamente pelas diferenças diárias observadas (Figura 4a). Ainda, as diferenças entre

os valores de déficit de pressão são explicadas pelas diferenças entre a temperatura da água e do ar (Figura 4b). Portanto, todas essas diferenças seguem o mesmo comportamento, tendo correlação de 0,9 entre si.

A diferença entre a temperatura do ar e da água é também avaliada em vista da variação sazonal entre diferentes modelos de evaporação. As maiores diferenças observadas entre a temperatura da água e do ar ocorrem ao final do outono até o início do inverno, segundo estudos da literatura (Hojjati *et al.*, 2020). Isto ocorre, pois, corpos d'água, como lagos e reservatórios, demoram mais tempo do que o ar para apresentar variação na sua temperatura, devido a maior capacidade térmica da água (Zhao *et al.*, 2020).

Figura 4 – Séries temporais das diferenças entre os métodos para estimativa da evaporação de lagos e reservatórios. a) Diferença entre os valores calculados de evaporação ( $\Delta$  Evaporação =  $EoD_V - EoP_V$ ) e diferença entre os valores de déficit de pressão calculados para cada método ( $\Delta$  Pressão de vapor =  $D_D - D_P$ ). b) Diferença entre os valores de déficit de pressão calculados para cada método ( $\Delta$  Pressão de vapor =  $D_D - D_P$ ) e diferença entre a temperatura da água e do ar ( $\Delta$  Temperatura =  $T_{agua} - T_{ar}$ ).



A influência da temperatura da água na diferença observada dos valores calculados de evaporação é estudada entre vários métodos e, de acordo com a análise de sensibilidade sobre parâmetros do balanço de energia realizado em estudos anteriores indicam que uma mudança de 10% na temperatura da superfície da água pode gerar uma variação de 16,8% nos valores de evaporação de um reservatório (Gianniou e Antonopoulos, 2007).

Para estimar a temperatura da água, estudos focados nas transferências de energia em lagos obtiveram bons resultados utilizando conceitos de temperatura de equilíbrio, que é definida como a temperatura da superfície na qual a taxa líquida de troca de calor seria zero (McJannet *et al.*, 2008; Finch, 2001; Keijman, 1974). Outros estudos utilizaram modelos hidrodinâmicos, como o Lake Temperature and Evaporation Model (LTEM) (Zhao *et al.*, 2020) e usado juntamente com o Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) para estimar perfis de temperatura de lagos e, então, utilizar os dados para calcular evaporação, obtendo resultados 28% mais acurados em comparação com a equação de Penman tradicional. Ainda, outra alternativa foi criar um modelo de temperatura da água baseado em dados medidos de temperatura da água durante 3 anos (Hojjati *et al.*, 2020).

É importante também considerar que ainda com as aproximações para a temperatura da água, incertezas estão embutidas em várias etapas do cálculo de evaporação, como os próprios dados que

são coletados em terra, incertezas dos sensores meteorológicos e, para o cálculo do volume evaporado, a estimativa da área superficial do reservatório (Zhao *et al.*, 2020).

## CONCLUSÃO

Os resultados indicaram que o método de Penman e o modelo hidrodinâmico Delft3D são similares para estimar a evaporação total em volume acumulado para períodos longos, neste caso, um ano, apresentando uma alta correlação e pequenas discrepâncias. No entanto, ao analisar as taxas de evaporação diária, observou-se um comportamento diferente entre os dois métodos, com baixa correlação. Essa diferença está atrelada às variações nos valores do déficit de pressão de vapor calculados para cada método, que por sua vez estão relacionados às diferenças entre as temperaturas da água e do ar. Assim, estudos que utilizam a equação de Penman ou simplificações para estimar a taxa de evaporação diária devem considerar que ocorrem diferenças diárias. Para evitar erros causados por aproximação da temperatura da água pelo do ar, alguns estudos estimam a temperatura da água por meios de métodos de balanço de energia, modelos hidrodinâmicos ou dados históricos. Contudo, como incertezas são geradas em cada etapa do cálculo de evaporação, mais estudos são necessários para determinar quais os melhores modelos e aproximações para cada caso particular.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o financiamento da Fundação Araucária e da SANEPAR (Chamada Pública 17/2021, PROGRAMA PARANAENSE DE PESQUISAS EM SANEAMENTO AMBIENTAL (PPPSA)). Este trabalho foi realizado com o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Betina Kleinschmidt e Erika Mariellen agradecem a bolsa de iniciação científica do CNPq. Tobias Bleninger agradece a bolsa de produtividade do CNPq, processo número 312211/2020-1, chamada número 09/2020. Rafael de Carvalho Bueno e Camila Bergmann Goulart agradecem a CAPES pela bolsa – código de financiamento 001.

## REFERÊNCIAS

- BARANI DESIGN. MeteoTemp RH+T+P sensor. 2017.
- BARANI DESIGN. MeteoWind 2 wind sensor. 2017.
- CHOW, V. T. (1998). *Applied Hydrology*. New York: McGraw-Hill.
- DALTON, J. (1802). "Experimental essays on the constitution of mixed gases; on the force of steam or vapor from water and other liquids in different temperatures, both in a Torricellian vacuum and in air; on evaporation and on the expansion of gases by heat." *Memoirs of Manchester Literary and Philosophical Society*, 5, pp. 535–602.
- DELTARES. (2023). *Delft3D-FLOW: Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments*. Delft, Netherlands: Deltares.
- EKO. MS-80 Pyranometer. 2020.
- FINCH, J. W. (2001). "A comparison between measured and modelled open water evaporation from a reservoir in southeast England". *Hydrol. Process.*, 15, pp. 2771–2778.
- GALLEGO-ELVIRA, B. et al. (2012). "Evaluation of evaporation estimation methods for a covered reservoir in a semi-arid climate (south-eastern Spain)". *Journal of Hydrology* 458-459, pp. 59 – 67.



- GIANNIOU S.K.; ANTONOPOULOS V.Z. (2007). "Evaporation and energy budget in Lake Vegoritis, Greece". *Journal of Hydrology*, 351 (3), pp. 212-223.
- GILL, A. E. (1982). *Atmosphere-Ocean dynamics*, vol. 30 of International Geophysics Series. Academic Press.
- HASSAN, A. et al. (2017). "Evaluating Evaporation Rates Using Numerical Model (Delft3D)". *Current Science International*, 06(02), pp. 402-411.
- HASSEN, B.; ABID, O. (2017). "Surface water leakage, sedimentation and evaporation in arid regions: A case study of the Gargar dam, Algeria". *Journal of Water and Land Development*, (35).
- HOJJATI, E. et al. (2020). "Estimating evaporation from reservoirs using energy budget and empirical methods: Alavian dam reservoir, NW Iran". *Italian Journal of Agrometeorology* (2), pp. 19-34. doi: 10.13128/ijam-1033.
- LANE, A. (1989). *The heat balance of the North Sea*. Tech. Rep. 8, Proudman Oceanographic Laboratory, 45 p.
- LENTERS, J.D. et al. (2005). "Effects of climate variability on lake evaporation: Results from a long-term energy budget study of Sparkling Lake, northern Wisconsin (USA)". *Journal of Hydrology* (308), pp. 168–195.
- MARCON, L. et al. (2019). "High-frequency measurements of gas ebullition in a Brazilian subtropical reservoir—identification of relevant triggers and seasonal patterns". *Environ Monit Assess* 191, 357. <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7498-9>.
- MCJANNET D.L. et al. (2008). *Estimating open water evaporation for the Murray Darling Basin. A report to the Australian Government from the CSIRO Murray-Darling Basin Sustainable Yields Project*. CSIRO Canberra, Australia, 50p.
- MCMAHON, T.A. et al. (2013). "Estimating actual, potential, reference crop and pan evaporation using standard meteorological data: a pragmatic synthesis". *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 17, pp. 1331–1363, <https://doi.org/10.5194/hess-17-1331-2013>.
- NICHOLS, J. et al. (2004). "Comparison of evaporation estimation methods for a riparian area". *Hydroscience and Engineering*, IIHR Technical Report No 436, University of Iowa.
- PIMENTEL, L. (2011). *Hidrologia - Engenharia e Meio Ambiente*. São Paulo: Oficina de Textos.
- ROCHA, S.M.G. et al. (2023). "Assessment of total evaporation rates and its surface distribution by tridimensional modelling and remote sensing". *Journal of Environmental Management*, 327, 116846.
- TANNY J. et al. (2008). "Evaporation from a small water reservoir: Direct measurements and estimates". *Journal of Hydrology* 351, pp. 218– 229.
- TUKEY, J. (1997). *Exploratory Data Analysis*. London: Addison-Wesley, 711 p.
- ZHAO, G. et al. (2020). "Estimating lake temperature profile and evaporation losses by leveraging MODIS LST data". *Remote Sensing of Environment*, 251, 112104.