

# IMPACTO DAS MUDANÇAS DO CLIMA NA SEGURANÇA HÍDRICA DA REGIÃO METROPOLITANA DE SÃO PAULO: AVALIAÇÃO DA EVAPORAÇÃO NO SISTEMA CANTAREIRA

João Vitor Kochinski Trevisan

Felipe Augusto Arguello Souza

Eduardo Mario Mediondo

Escola de Engenharia de São Carlos/Universidade de São Paulo

joao.trevisan@usp.br

## Objetivos

O objetivo desta pesquisa é avaliar como as mudanças climáticas afetam a segurança hídrica da Região Metropolitana de São Paulo, considerando os impactos na evaporação dos grandes reservatórios, a partir da hipótese de que as mudanças no clima afetarão negativamente a segurança hídrica da região ao provocar a redução da disponibilidade de água nos reservatórios. Para tanto determinou-se os seguintes objetivos específicos:

- i. Ajustar um modelo local a partir de modelos teóricos encontrados na literatura e com base na série histórica de evaporação;
- ii. Testar as projeções hidroclimáticas para os reservatórios utilizando o modelo calibrado e analisar os possíveis impactos na segurança hídrica.

## Métodos e Procedimentos

As variáveis necessárias para determinação da evaporação nos reservatórios do sistema Cantareira foram obtidas a partir dos dados medidos pelo Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas (IAG), da Universidade de São Paulo (USP). Os dados disponibilizados são valores diários referentes ao período de janeiro de 2000 a dezembro de 2019, com informações de temperatura do ar e do bulbo úmido, umidade relativa do ar, intensidade e direção do vento, irradiância média diária,

duração do brilho solar, ponto de orvalho, e pressão atmosférica, além de dados de evaporação medidos a partir da leitura da coluna de água do evaporímetro tipo Piché exposto ao ar livre.

Calculou-se a evaporação a partir de oito modelos existentes na literatura: Método combinado de Penman; Método de Thornwaite; Método de Blaney-Criddle; Método de Linacre; Método de Kohler; Método de Hamon; Método de Jensen-Haise; Método de Priestley-Taylor.

Para determinar um modelo de cálculo da evaporação para a região, realizou-se uma análise de regressão multivariada a fim de se obter um modelo de evaporação para a região que utiliza, como variáveis de entrada, os próprios modelos teóricos já existentes, ajustado de acordo com os dados de evaporação medidos pelo IAG. Com o modelo ajustado, realizou-se a calibração, cuja performance foi analisada a partir dos coeficientes  $R^2$ , RMSE, NSE, KGE e Pbias.

Para avaliar o impacto das mudanças climáticas na evaporação foram obtidos dados diários das mesmas variáveis utilizadas do IAG, de dois modelos climáticos diferentes: HadGEM2-ES, com resolução de 5 km, e MIROC5, com resolução de 20 km. Cada modelo possui projeções para dois cenários de emissão de Gases do Efeito Estufa: RCP 4.5, mais otimista, e RCP 8.5, mais pessimista.

Para adequar as projeções, realizou-se a correção de viés, feita utilizando os dados

históricos observados pelo IAG e os dados do modelo de projeção para o mesmo período. Enquanto os dados de projeções corrigidos são referentes aos anos de 2021 a 2099.

A partir das variáveis climáticas geradas pelos modelos de projeções, determina-se a evaporação potencial diária correspondente utilizando o modelo de cálculo ajustado e calibrado para cada um dos reservatórios que compõem o Sistema Cantareira: Jaguari-Jacareí, Cachoeira, Atibainha e Paiva Castro.

## Resultados

A partir dos modelos de Penman, Thornwaite, Blaney-Cridde, Linacre, Kohler, Hamon, Jensen-Haise, e Priestley-Taylor, obteve-se 8 valores diferentes de evaporação diária. Analisando a dispersão dos resultados, com os valores observados pelo IAG, notou-se que nenhum modelo apresentava uma forte relação linear com a evaporação real, indicando que eles podem não ser representativos para a região de estudo, uma vez que não foram desenvolvidos para as condições do Brasil, motivo pelo qual realizou-se a análise de regressão linear, para obter-se um modelo local.

A análise retornou os coeficientes de uma equação multilinear ajustados, apresentados na Equação 1. A performance da calibração feita a partir da equação obtida resultou em  $R^2 = 0,89$ ,  $NSE = 0,89$  e  $KGE = 0,92$ , ou seja, há uma relação linear entre a equação e a evaporação observada, indicando que a análise é satisfatória e que o modelo da Equação 1 pode representar adequadamente a evaporação na região.

$$E = 1,193 + 28,821x_{Pen} + 0,280x_{Tho} - 0,243x_{Bla} - 0,121x_{Lin} + 17,049x_{Koh} - 1,030x_{Ham} + 1,584x_{Jen} - 32,558x_{Pri} \quad (1)$$

Onde E é a evaporação observada e  $x_i$  é a evaporação obtida pelo modelo teórico i, todos os valores em mm/dia.

Os resultados obtidos pela correção de viés dos dados de projeções climáticas de cada modelo e para cada reservatório são as variáveis de entrada do modelo obtido pela regressão multilinear. Assim, utilizando a Equação 1, obteve-se a evaporação potencial diária projetada para o período de análise. A Tabela 1 apresenta, em resumo, os valores médios das evaporações resultantes para cada

reservatório, considerando todos os modelos climáticos, e das evaporações observadas na série histórica.

Tabela 1: Valores médios de evaporação projetada para cada reservatório

Reservatório	Evaporação média (mm/dia)
Jaguari-Jacareí	4,2
Cachoeira	4,2
Atibainha	4,3
Paiva Castro	4,3

A evaporação média da série história é 3,9 mm, portanto, comparando com os valores da Tabela 1, nota-se que a evaporação média projetada para até o final do século XXI, é em torno de 10% maior que a evaporação média observada nos primeiros 20 anos do século. Este resultado demonstra que há probabilidade de que a evaporação média dos próximos anos pode aumentar, resultando em maior perda de água dos reservatórios por esse meio. Os dados ainda mostraram que a máxima evaporação dos reservatórios pode chegar até 35% maior que a máxima observada nos últimos anos, indicando tendência de aumentar devido aos efeitos das mudanças climáticas.

## Conclusões

Calculou-se a evaporação potencial teórica a partir de oito modelos diferentes na literatura, que não demonstraram ser adequados para a região, e realizou-se uma análise de regressão multilinear, pela qual obteve-se um modelo local de evaporação que possui como variáveis a evaporação teórica calculada por cada modelo. Este modelo, por fim, apresentou métricas de performance satisfatórias que possibilitam sua utilização para determinação da evaporação na região.

A partir do modelo obtido, e utilizando dados de modelos de projeções climáticas, calculou-se a taxa de evaporação projetada para os próximos 80 anos. Os resultados mostraram que há a probabilidade de aumento da taxa média de evaporação no futuro, aumentado em torno de 10% quando comparado a média observada nos últimos 20 anos, indicando que as mudanças no clima podem impactar negativamente na segurança hídrica da região.