



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

GABRIELA PINHEIRO FEITOSA

CÁLCULO DA EVAPORAÇÃO EM RESERVATÓRIO TROPICAL POR DIVERSOS
MÉTODOS: O CASO DO AÇUDE GAVIÃO

FORTALEZA

2020

GABRIELA PINHEIRO FEITOSA

CÁLCULO DA EVAPORAÇÃO EM RESERVATÓRIO TROPICAL POR DIVERSOS
MÉTODOS: O CASO DO AÇUDE GAVIÃO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Manejo e Conservação de Bacias Hidrográficas.

Orientador: Prof. Dr. José Carlos de Araújo

FORTALEZA

2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

F336c Feitosa, Gabriela Pinheiro.
Cálculo da evaporação em reservatório tropical por diversos métodos : o caso do açude Gavião / Gabriela Pinheiro Feitosa. – 2020.
102 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Fortaleza, 2020.
Orientação: Prof. Dr. José Carlos de Araújo .

1. Hidrologia de regiões semiáridas. 2. Reservatórios. 3. Perda de água. I. Título.

CDD 630

GABRIELA PINHEIRO FEITOSA

CÁLCULO DA EVAPORAÇÃO EM RESERVATÓRIO TROPICAL POR DIVERSOS
MÉTODOS: O CASO DO AÇUDE GAVIÃO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Manejo e Conservação de Bacias Hidrográficas.

Aprovada em: ___/___/_____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Carlos de Araújo (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Pedro Henrique Augusto Medeiros
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE)

Prof. Dr. Adelená Gonçalves Maia
Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)

Dr. Mário Ubirajara Gonçalves Barros
Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Ceará (COGERH)

AGRADECIMENTOS

A Deus, meu pai celestial, pela força, saúde e minha fé.

Aos meus amados pais Roberto e Lucicler pelo carinho e apoio durante toda a minha vida.

Ao Prof. José Carlos de Araújo, meu orientador, pelas orientações, pelo apoio, correções e pelas sugestões ao longo de toda esta pesquisa que tornaram possível a conclusão deste estudo.

Aos professores convidados da banca examinadora, Prof. Pedro Medeiros, Prof^a. Adelena Gonçalves Maia e Dr. Mário Ubirajara Barros, pela gentileza de terem aceitado o convite, pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

Ao Prof. Armin Raabe e ao Dr. Peter Holstein pela cessão do sensor de pressão, por sua instalação e verificação, como também, pela troca de conhecimentos.

À Universidade Federal Ceará, e a todo corpo docente do curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, que me deram subsídios intelectuais para elaborar o presente trabalho.

À COGERH, que possibilitou e permitiu a implantação dos instrumentos de medição e o acesso a informações essenciais a esta pesquisa.

Aos meus de colegas do grupo Hidrosed, que contribuíram para minha formação. Agradeço as conversas, dicas, apoio, ajudas em campo. Em especial ao Glauber, Jairo e Ítalo que me ajudaram muita na realização desta pesquisa.

A toda minha família e amigos por me acompanharem e por me darem força e esperança.

Ao CNPq, pela concessão da bolsa que auxiliou na execução deste trabalho e pelos recursos que financiaram o projeto 407999/2016-7; e à Capes pelo contínuo apoio ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da UFC e ao Programa PRINT/UFC, processo 88881.311770/2018-01, que financiou a vinda dos parceiros alemães.

Agradeço grandiosamente a todos que acreditaram em mim e nesse trabalho.

RESUMO

O processo de evaporação é visto pelo setor de gestão das águas como uma “perda” que impacta de forma negativa a densa rede de barragens da região, reduzindo a oferta hídrica numa área suscetível a secas. Estudos que possibilitem a obtenção de estimativas precisas de evaporação em reservatórios representam uma importante ação para o adequado gerenciamento dos recursos hídricos. Objetivou-se, portanto, estimar a evaporação no reservatório tropical Gavião, Ceará, Brasil, no período de 11 de outubro a 11 de dezembro de 2019, a partir de diversos métodos: (i) Penman, usando-se três estações situadas em diferentes posições; (ii) balanço hídrico; e (iii) sensor de alta precisão, que mede a diferença de nível d’água com base em medidas de pressão. Objetiva-se também verificar se há (e qual) efeito da localização da estação meteorológica na estimativa da evaporação por Penman. Foram utilizados dados meteorológicos coletados em uma estação meteorológica flutuante instalada sobre o lago do açude, uma estação instalada em ambiente terrestre, cerca de 400 m do espelho d’água do reservatório e uma estação no Campus do Pici em Fortaleza, a 19 km do espelho d’água do reservatório. Os resultados de dois métodos convencionais de quantificação da evaporação foram comparados com os valores obtidos do sensor de pressão, o mais preciso. O método de Penman baseado nos dados da estação embarcada mostrou ser o mais favorável na escala diária e mensal apresentando um melhor ajuste. Diferenças na evaporação média por esses métodos variaram entre 1 e 7 mm/dia. O método do balanço hídrico apresentou as maiores taxas de evaporação, superestimadas devido à imprecisão de seu cálculo e à alta incerteza nas medições dos seus termos. Ao comparar as estimativas de evaporação pelo método de Penman, observou-se que as estações no entorno do reservatório superestimam a evaporação, provavelmente por as estações registrarem maior radiação solar. Isso pode ter contribuído para a superestimativa da evaporação, já que o método de Penman apresentou uma forte sensibilidade à variação da radiação solar. A evaporação estimada por estações meteorológicas com diferentes proximidades do espelho d’água diferem estatisticamente daquela obtida pela estação sobre o espelho d’água. Conclusivamente, podemos afirmar, com base nos dados levantados nessa pesquisa, que os dois métodos amplamente usados no semiárido brasileiro, quais sejam, (i) o do balanço hídrico com a hipótese de infiltração desprezível; e (ii) o de Penman baseado em dados de estações localizadas em terra e distantes do lago não são confiáveis, principalmente para a escala temporal diária.

Palavras-chave: Hidrologia de regiões semiáridas. Reservatórios. Perda de água.

ABSTRACT

The evaporation process is seen by the water management sector as a "loss" that negatively impacts the region's dense network of dams, reducing the water supply in an area susceptible to drought. Studies that make it possible to obtain accurate evaporation estimates in reservoirs represent an important action for the adequate management of water resources. The objective was, therefore, to estimate evaporation in the tropical reservoir Gavião, Ceará, Brazil, between 11 October and 11 December 2019, using several methods: (i) Penman, using three stations located in different positions; (ii) water balance; and (iii) high precision sensor, which measures the difference in water level based on pressure measurements. It is also intended to verify if there is (and what) effect of the location of the weather station on the estimation of evaporation by Penman. We used meteorological data collected from a floating meteorological station installed on the reservoir lake, a station installed in a terrestrial environment, about 400 m from the water mirror of the reservoir and a station at the Pici Campus in Fortaleza, 19 km from the water mirror of the reservoir. The results of two conventional methods of quantification of evaporation were compared with the values obtained from the pressure sensor, the most accurate. Penman's method based on the data from the embarked station proved to be the most favorable in the daily and monthly scale, presenting a better adjustment. Differences in the average evaporation by these methods varied between 1 and 7 mm/day. The water balance method presented the highest evaporation rates, overestimated due to the imprecision of its calculation and the high uncertainty in the measurements of its terms. When comparing the evaporation estimates by Penman's method, it was observed that the stations around the reservoir overestimate the evaporation, probably because the stations recorded higher solar radiation. This may have contributed to the overestimation of evaporation, since the Penman method showed a strong sensitivity to variation in solar radiation. The evaporation estimated by meteorological stations with different proximity to the water mirror differ statistically from that obtained by the station on the water mirror. Conclusively, we can state, based on the data collected in this research, that the two methods widely used in the Brazilian semiarid region, which are, (i) that of the water balance with the hypothesis of negligible infiltration; and (ii) that of Penman based on data from stations located on land and distant from the lake are not reliable, especially for the daily time scale.

Keywords: Hydrology of semi-arid regions. Reservoirs. Water Loss.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Visão do Reservatório Gavião a partir da estação de bombeamento EB0	30
Figura 2	– Mapa de localização do Reservatório Gavião, local da pesquisa	32
Figura 3	– Percurso do Eixão das Águas que liga o Açude Castanhão ao Sistema integrado Pacoti-Riachão-Gavião	33
Figura 4	– Estações meteorológicas utilizadas no trabalho (a) estação automática instalada sobre o espelho d'agua (b) estação meteorológica automática instalada às margens do açude (c) estação meteorológica convencional instalada no Campus do Pici	34
Figura 5	– Estações meteorológicas convencional (EMC) e automáticas (EMA) instaladas no Campus do Pici, Fortaleza, Ceará. Foto obtida no dia 12 de novembro de 2018	36
Figura 6	– Esquematização dos componentes do balanço hídrico no reservatório Gavião	41
Figura 7	– Infraestrutura de transferência de água entre os açudes Riachão e Gavião. (a) Canal que transpõe água do Açude Riachão para o Açude Gavião e (b) válvula de abertura da comporta do canal que interliga as águas do Açude Riachão ao Açude Gavião	43
Figura 8	– Seção do túnel que interliga os reservatórios Riachão e Gavião	44
Figura 9	– Relação entre a abertura média das comportas e do Fator Kc de perda de carga das comportas	45
Figura 10	– Esquema do sensor de pressão acoplado ao tanque	46
Figura 11	– Tanque com o sensor de pressão imerso nas águas do Reservatório Gavião e preso a quatro flutuadores (estruturas azuis)	47
Figura 12	– Validação das estações meteorológicas através da comparação de dados diários para o período de 11 a 30 de novembro de 2018, no Campus do Pici, Fortaleza, CE. (a) temperatura média do ar observados em EMA 1 e EMC; (b) temperatura média do ar observados em EMA 2 e EMC; (c) umidade	

relativa média do ar observados em EMA 1 e EMC; e (d) umidade relativa do ar observados em EMA 2 e EMC	52
Figura 13 – Validação das estações meteorológicas através da comparação de dados diários para o período de 11 a 30 de novembro de 2018, no Campus do Pici, Fortaleza, CE. (a) temperatura máxima do ar observada em EMA 1 e EMC; (b) temperatura máxima do ar observada em EMA 2 e EMC; (c) temperatura mínima do ar observada em EMA 1 e EMC; e (d) temperatura mínima do ar observada em EMA 2 e EMC	53
Figura 14 – Validação das estações meteorológicas através da comparação de dados diários para o período de 11 a 30 de novembro de 2018, no Campus do Pici, Fortaleza, CE. (a) precipitação pluviométrica observada na EMA 1 e EMC; (b) precipitação pluviométrica observada na EMA 2 e EMC	54
Figura 15 – Validação das estações meteorológicas através da comparação de dados diários para o período de 11 a 30 de novembro de 2018, no Campus do Pici, Fortaleza, CE. (a) velocidade do vento a 2 m de altura registrada na EMA 1 e estimada para a EMC; (b) velocidade do vento a 2 m de altura registrada na EMA 2 e estimada para a EMC; (c) radiação solar global registrada na EMA 1 e estimada para a EMC; e (d) radiação solar global registrada na EMA 2 e estimada para a EMC	55
Figura 16 – Validação das estações meteorológicas através da comparação de dados diários da evaporação diária estimada por Penman, para o período de 11 a 30 de novembro de 2018, no Campus do Pici, Fortaleza, CE. (a) evaporação diária estimada pelos dados climatológicos da EMA 1 e estimada pela a EMC; (b) evaporação diária estimada pelos dados climatológicos da EMA 2 e estimada pela a EMC	56
Figura 17 – Validação das estações meteorológicas através da comparação de dados diários da evaporação diária estimada por Penman, para o período de 11 a 30 de novembro de 2018, no Campus do Pici, Fortaleza, CE. (a) temperatura do ar observada na EMA 1 e EMA 2; (b) umidade relativa do ar observada na EMA 1 e EMA 2; (c) velocidade do vento a 2 m observada em EMA 1 e EMA 2; (d) precipitação observada na EMA 1 e EMA 2; (e) radiação solar global (Qg) observada em EMA 1 e EMA 2; e (f) evaporação diária	

estimada através do dados climáticos da EMA 1 e EMA 2	58
Figura 18 – Validação das estações meteorológicas através da comparação de dados diários da evaporação diária estimada por Penman, para o período de 11 a 30 de novembro de 2018, no Campus do Pici, Fortaleza, CE. (a) temperatura do ar observada em EMA 1 e EMA 2; (b) umidade relativa do ar observada em EMA 1 e EMA 2; (c) velocidade do vento a 2 m observada em EMA 1 e EMA 2; (d) precipitação observada em EMA 1 e EMA 2; (e) radiação solar global observada em EMA 1 e EMA 2; e (f) evaporação diária estimada por EMA 1 e EMA 2	59
Figura 19 – Evaporação diária (mm) no reservatório Gavião estimada pelo método de Penman (1948) com base em dados de três estações meteorológicas	60
Figura 20 – Ajuste de curvas polinomiais para estimativa da variação do volume no tempo, para o reservatório Gavião no período de 10 de outubro a 11 de dezembro de 2019. Os índices associados ao símbolo V (volume) representam as fases de oscilação do estoque de água no reservatório	61
Figura 21 – Evaporação máxima estimada pelo método do balanço hídrico para médias móveis de 1 dia, 2 dias, 3 dias e 7 dias. O experimento teve início no dia 11 de outubro de 2019	64
Figura 22 – Evaporação mínima estimada pelo método do balanço hídrico nos passos de tempo de 1 dia, 2 dias, 3 dias e 7 dias. O experimento teve início no dia 11 de outubro de 2019	64
Figura 23 – Evaporação diária (mm) no reservatório Gavião estimada pelo sensor de diferença de pressão	66
Figura 24 – Evaporação diurna e noturna (mm/12h) no reservatório Gavião estimada pelo método de Diferença de pressão	67
Figura 25 – Boxplot da evaporação diurna e noturna no reservatório Gavião estimada pelo método de Diferença de pressão no período de 11 de outubro a 11 de dezembro de 2019	67

Figura 26 – Evaporação média de 7 dias (mm) no reservatório Gavião para o período de 11 de outubro a 11 de dezembro de 2019 estimada pelos modelos do balanço hídrico, de Penman e pelo sensor de diferença de pressão. A área em cinza representa a faixa evaporação, entre a estimativa de evaporação máxima e de evaporação mínima estimada pelo método do Balanço hídrico, que pode ocorrer no reservatório Gavião	70
Figura 27 – Comparação entre as evaporações estimadas pelos métodos convencionais de Penman e do Balanço hídrico e o método de referência de diferença de pressão hidrostática na escala diária no reservatório Gavião, Pacatuba, Ceará, Brasil, entre 11 de outubro e 11 de dezembro de 2019	73
Figura 28 – Comparação entre a evaporação estimada pelo método de Penman (1948) usando dados de uma estação embarcada no reservatório Gavião e das estações localizadas em terra. O período dos dados corresponde a 11 de outubro a 11 de dezembro de 2019	75
Figura 29 – Temperatura do ar diária para o período de 11 de outubro a 11 de dezembro de 2019 das estações meteorológicas: embarcada, na margem do açude e do Campus do Pici	77
Figura 30 – Velocidade do vento diária para o período de 11 de outubro a 11 de dezembro de 2019 das estações meteorológicas: embarcada, na margem do açude e do Campus do Pici	78
Figura 31 – Radiação solar diária para o período de 11 de outubro a 11 de dezembro de 2019 das estações meteorológicas: embarcada, na margem do açude e do Campus do Pici	79
Figura 32 – Umidade relativa diária para o período de 11 de outubro a 11 de dezembro de 2019 das estações meteorológicas: embarcada, na margem do açude e do Campus do Pici	80
Figura 33 – Sensibilidade do modelo de Penman (1948) usando dados de uma estação embarcada no reservatório Gavião e das estações localizadas em terra aos parâmetros climáticos relativos à temperatura do ar (A), velocidade do vento (B), radiação solar (C) e umidade relativa (D)	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Informações sobre as estações meteorológicas utilizadas	34
Tabela 2 – Características dos sensores das estações meteorológicas: convencional (EMC) e automáticas (EMA 1 e EMA 2)	37
Tabela 3 – Comparação entre as formas de obtenção dos dados meteorológicos absolutos e médios das estações meteorológicas convencional (EMC) e automáticas (EMA 1 e EMA 2)	38
Tabela 4 – Avaliação do índice de desempenho "c" proposto por Camargo e Sentelhas (1997)	48
Tabela 5 – Índices estatísticos para análise da concordância entre as variáveis: temperatura média (Tmed), temperatura máxima (Tmax), temperatura mínima (Tmin), umidade relativa do ar (UR), velocidade do vento a 2 m (V. Vento), precipitação (Prec.) e radiação solar global (Qg), obtidos nas estações EMA 1, EMA 2 e EMC, no Campus do Pici, Fortaleza, CE, de 11 a 30 de novembro de 2018	56
Tabela 6 – Índices estatísticos para análise da concordância entre as variáveis meteorológicas obtidos nas EMA 1 e EMA 2	60
Tabela 7 – Evaporação diária média, desvio padrão, máxima e mínima no reservatório Gavião estimada pelo método de Penman no período de 11 de outubro a 11 de dezembro de 2019	62
Tabela 8 – Valores médios e desvio padrão da evaporação máxima e mínima estimada pelo método do balanço hídrico no reservatório Gavião nos passos de tempo (média móvel) de 1 dia, 2 dias, 3 dias e 7 dias. Período de 11 de outubro a 11 de dezembro de 2019	65
Tabela 9 – Evaporação diária média, desvio padrão, máxima e mínima no reservatório Gavião estimada pelo sensor de diferença de pressão no período de 11 de outubro a 11 de dezembro de 2019	66
Tabela 10 – Taxa de evaporação diurna e noturna (mm/h) no reservatório Gavião estimada pelo método de Diferença de pressão	68

Tabela 11 – Taxas médias de evaporação diária (mm), assim como evaporação total no período do estudo (mm) estimada pelos métodos de Penman, do balanço hídrico e do sensor de diferença de pressão no Açude Gavião, Ceará, entre 11 de outubro e 11 de dezembro de 2019	71
Tabela 12 – Análise estatística da correlação entre os métodos convencionais de Penman e do balanço hídrico e o método de referência (pressão hidrostática) na escala diária no reservatório Gavião, Ceará, entre 11 de outubro e 11 de dezembro de 2019	73
Tabela 13 – Índices estatísticos para análise da concordância entre os métodos de estimativa de evaporação no Açude Gavião, entre 11 de outubro e 11 de dezembro de 2019	76
Tabela 14 – Índice de sensibilidade (IS) do modelo de Penman as variáveis climáticas: temperatura do ar, velocidade do vento, radiação solar e umidade relativa, no período de 11 de outubro a 11 de dezembro de 2019 das estações meteorológicas: embarcada, na margem do açude e do Campus do Pici	80

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

COGERH	Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Ceará
DNOCS	Departamento Nacional de Obras Contra as Secas
EMA	Estação meteorológica automática
EMC	Estação meteorológica convencional
FUNCEME	Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
RMF	Região Metropolitana de Fortaleza
WMO	World Meteorological Organization

LISTA DE SÍMBOLOS

a	coeficiente linear
A	área
b	coeficiente angular
BI	ano bissexto
c	coeficiente de desempenho
CRM	coeficiente de massa residual
C_p	calor específico do ar a pressão constante
D_i	diâmetro equivalente do túnel
d	índice de concordância
dj	dia juliano
dm	massa de líquido por unidade de área
dr	correção da excentricidade da órbita terrestre
dt	variação do tempo
dV	variação do volume armazenado
E	taxa de evaporação
ΔE	perda de carga
E	Taxa mássica de evaporação
e_a	tensão de vapor do ar
E_a	poder evaporante do ar em função das condições aerodinâmicas
E_r	poder evaporante do ar em função da radiação
e_s	tensão de vapor saturado à superfície
EM	erro médio
EPE	erro padrão da estimativa
$E_{+50\%}$	estimativa de evaporação em função da variável independente σ aumentada em 50%
$E_{-50\%}$	estimativa de evaporação em função da variável independente σ reduzida em 50%
E_0	estimativa de evaporação em função da variável independente σ para seu valor de referência
f	fator de atrito de Darcy-Weisbach
G	vazão de aporte pelo fluxo subterrâneo

g	aceleração da gravidade
H	altura da coluna d'água
I	vazão de infiltração mais percolação pela parede da barragem
IS	índice de sensibilidade
k	constante de Prandtl-von Kármán
K_H	coeficiente de difusão turbulenta para o calor
K_W	coeficiente de difusão turbulenta para o vapor de água
k_c	perda de carga da saída do túnel
k_s	perda de carga nas comportas
$\sum k$	perda de carga localizada
L	comprimento do túnel
n	insolação
N	Fotoperíodo
O_i	valores de referência ou padrão
\bar{O}	média dos valores de referência
P	vazão gerada pela precipitação direta na superfície livre
Δp	diferença entre a pressão hidrostática
P_i	valores simulados (ou os valores a serem comparados)
p-value	probabilidade que mede a evidência contra a hipótese nula.
Q	vazão de entrada no sistema por meio dos rios
Q_{CANAL}	vazão regularizada que entra no Gavião pelo canal de interligação deste com o Pacoti-Riachão
Q_E	vazão evaporada
Q_{ENT}	vazão de entrada no reservatório
Q_S	vazão vertida (ou <i>sangrada</i>)
Q_o	radiação no topo da atmosfera
r	
R	vazão de retirada
R^2	coeficiente de determinação
Re_y	número de Reynolds
R_n	saldo de radiação
R_{nl}	saldo de radiação de ondas longas
R_{ns}	saldo de radiação de ondas curtas

R_s	radiação solar global
RMSE	erro padrão da estimativa normalizado
R_n	saldo de radiação
t	Tempo
T_a	temperatura do ar
$T_{MÁX}$	temperatura máxima
$T_{MÍN}$	temperatura mínima
T_s	temperatura da superfície da água
u	velocidade do fluxo de água
u_2	velocidade do vento a 2 metros acima da superfície
u^*	velocidade de atrito
UR	umidade relativa do ar
u_z	velocidade do vento medida na altura z acima da superfície
w	parâmetro de Angstrom
x	abertura média das comportas
y	parâmetro de Angstrom
z	altura da medida sobre a superfície (m)
z_0	parâmetro de rugosidade da superfície
σ	variável independente
σ_0	variável independente para seu valor de referência
$\sigma_{+50\%}$	variável independente aumentada em 50%
$\sigma_{-50\%}$	variável independente reduzida em 50%
τ	Tensão de cisalhamento no limite do fluxo
δ	declinação solar
ε	rugosidade absoluta
Φ	latitude em radianos
ν	viscosidade cinemática da água
Δ	declividade da curva de tensão de vapor
γ	parâmetro psicrométrico
λ	calor latente de vaporização
ρ	densidade da água
ρ_{vento}	densidade do vento
ω_s	ângulo solar

α

Albedo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
2	REVISÃO DE LITERATURA	22
2.1	Evaporação em superfícies livres: importância, definições e fatores determinantes	22
2.2	Estimativa de evaporação	25
2.2.1	<i>Método de Penman</i>	25
2.2.2	<i>Método do Balanço hídrico</i>	27
2.2.3	<i>Método de Diferença de pressão</i>	29
3	ÁREA DE ESTUDO	30
4	MATERIAL E MÉTODOS	34
4.1	Aquisição de dados meteorológicos	34
4.1.1	<i>Validação dos dados das estações meteorológicas automáticas</i>	35
4.2	Estimativa da evaporação	38
4.2.1	<i>Método de Penman</i>	38
4.2.2	<i>Método do balanço hídrico</i>	41
4.2.3	<i>Método de diferença de pressão</i>	46
4.3	Análise dos dados	47
5	RESUTADOS E DISCUSSAO	50
5.1	Validação das estações meteorológicas	50
5.2	Evaporação no reservatório Gavião	60
5.2.1	<i>Estimativa da evaporação pelo método de Penman</i>	60
5.2.2	<i>Estimativa da evaporação pelo método do Balanço hídrico</i>	62
5.2.3	<i>Estimativa da evaporação pelo método de diferença de pressão</i>	65
5.3	Comparação entre as evaporações estimadas pelos diferentes métodos	68
5.4	Comparação entre as evaporações estimadas por Penman pelas diferentes estações meteorológicas	75
5.5	Análise de sensibilidade do modelo Penman às variáveis climáticas radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento	80
6	CONCLUSÃO	85
	REFERÊNCIAS	86

ANEXO A – DADOS DE VELOCIDADE DO VENTO MEDIDOS A 10M DA ESTAÇÃO METEOROLÓGICA CONVENCIONAL E OS VALORES CONVERTIDOS PARA 2M	92
ANEXO B – EVAPORAÇÃO (MM) MÉDIA DE 7 DIAS NO RESERVATÓRIO GAVIÃO OBTIDA PELOS MODELOS DO BALANÇO HÍDRICO, DE PENMAN E DE DIFERENÇA DE PRESSÃO.....	94
ANEXO C – MEDIDAS DO SENSOR DE PRESSÃO.....	96

1 INTRODUÇÃO

A evaporação é um dos principais processos envolvido no balanço hídrico e de energia em reservatórios, sendo responsável por transferir grandes quantidades de água e energia (por meio do fluxo de calor latente) para a atmosfera. Em reservatórios, esse processo é visto pelo setor de gerenciamento e planejamento de recursos hídricos como uma “perda” de água, pois em lagos tropicais representa um significativo volume de água que poderia ser disponibilizada. Principalmente em climas áridos e semiáridos, que sofrem com uma limitada oferta hídrica e eventos de seca recorrentes, reduz o estoque muitas vezes escasso de água (GALLEGO-ELVIRA *et al.* 2013; VIEIRA, 2015; MARTÍNEZ-ALVAREZ *et al.* 2008).

Conhecer as perdas por evaporação é uma informação de grande relevância para o gerenciamento e planejamento dos reservatórios, os quais possuem diversos usos, e para adequadas políticas de manejo dos recursos hídricos, gestão, operação dos reservatórios, construção e dimensionamento de um reservatório, e garantia ao atendimento da demanda hídrica. Além de impactos na quantidade, percebe-se também o papel relevante da evaporação quanto à qualidade da água nos reservatórios tropicais, que pode ser afetada pela maior concentração de poluentes, devendo ser observada na gestão deste bem (VIEIRA, 2015; FONTES, 2005).

A taxa de evaporação depende da disponibilidade de energia e do mecanismo de transferência de massa e energia, profundidade e área de superfície do reservatório e se dá em função das variáveis meteorológicas como radiação solar, temperatura, velocidade do vento, déficit de pressão de vapor, pressão atmosférica, além das características do ambiente circundante e do próprio reservatório (PENMAN, 1948). A estimativa de evaporação pode ser realizada pela utilização de modelos fundamentados no balanço de energia, nos processos de transferência de massa, no balanço hídrico, em métodos aerodinâmicos e/ou em métodos combinados por meio de formulações empíricas ou semi-empíricas. Pode-se estimar a evaporação também por meio de medidas por tanques de evaporação, por exemplo (LEÃO *et al.* 2013; COLLISCHONN & TASSI, 2011; CHOW *et al.* 1988).

A evaporação real em superfícies livres é um dado de difícil mensuração, mesmo para pequenos reservatórios. Há uma escassez de estudos experimentais sobre os processos físicos, como também, podemos listar algumas limitações pra a estimativa da evaporação: como incertezas no cálculo do balanço hídrico; e uma baixa densidade de estações climatológicas para utilização de métodos indiretos (12 estações em 150.000 km²). Assim, muitas vezes esses dados se reduzem a meros patamares de referência, sendo muitas vezes estimados por meio de

relações empíricas baseadas em variáveis climatológicas (temperatura, radiação solar, vento etc.) de regiões relativamente distantes, não representando as condições que se verificam sobre a superfície livre da água e assim não representando a real taxa de evaporação dos reservatórios (RODRIGUES, 2009; VIEIRA, 2015).

O Nordeste Brasileiro caracteriza-se naturalmente pelo alto potencial de evaporação em função da elevada disponibilidade de energia solar, que acarreta altas temperaturas. Além disso, contribuem para a escassez hídrica as precipitações irregulares e concentradas (MEDEIROS & DE ARAÚJO, 2014) e os solos rasos que fazem com que a região se caracterize por deficiência hídrica (KAYANO & ANDREOLI, 2009). Historicamente assolado por eventos de secas recorrentes, o Nordeste do Brasil gerou políticas públicas baseadas fundamentalmente na construção de infraestrutura hidráulica. A essa política denominou-se “fase hidráulica” (CAMPOS, 2015), buscou-se acumular água em reservatórios artificiais para que houvesse oferta nos períodos de escassez (inter- ou intra-anuais). Entretanto, como há grandes perdas de água por evaporação em reservatórios, percebe-se a importância de estimativas mais precisas da evaporação nestes reservatórios. Com isso, será possível promover gestão mais corrente, que se apoie no conhecimento preciso das reservas disponíveis (CAMPOS, 2010; CGEE, 2012; MARTINS *et al.* 2015).

Os eventos de seca fazem parte do cenário das regiões semiáridas, o que poderá se intensificar no futuro, de acordo com projeções das mudanças climáticas (MARENGO *et al.* 2016). Projeta-se um aumento da temperatura do ar o que, provavelmente, aumentaria a taxa de evaporação no Ceará em 15% até o final do século (KROL *et al.* 2011).

Importância do tema para a gestão dos recursos hídricos, dada a relevância do processo de evaporação no balanço hídrico em açudes. Segundo Vieira (2015), estima-se que, no reservatório de Sobradinho, que barra o Rio São Francisco, a vazão média anual decorrente da evaporação seria em torno de 203 m³/s. A título de comparação, a vazão firme autorizada para a transposição das águas do Rio São Francisco é de 26 m³/s. Portanto, um erro de treze por cento na estimativa da evaporação do reservatório significaria a mesma vazão da transposição, daí a importância de se conhecer com mais acurácia esses índices de evaporação.

É comum a estimativa da evaporação por meio de balanço hídrico, mas é difícil separar a evaporação das outras fontes responsáveis pela depleção do nível d'água, principalmente em um grande açude. Constituem processos corresponsáveis pela depleção as perdas e as retiradas. As principais perdas ocorrem por infiltração e percolação. Em relação às retiradas, algumas são conhecidas dos gestores, mas há frequentemente retiradas difusas não contabilizadas.

Nesse contexto, são as seguintes as questões científicas relativas ao tema: (i) há diferença significativa da estimativa de evaporação de um reservatório, usando-se a equação de Penman, quando os dados meteorológicos são medidos sobre o lago ou em ambiente terrestre (às margens ou apenas próximos) ao reservatório?; e (ii) qual o erro que se estaria cometendo ao estimar a evaporação pelo método do balanço hídrico?

A hipótese apresentada no âmbito desta dissertação é de que existe diferença ao estimar os valores de evaporação de um reservatório, dependendo de onde são medidas as variáveis climatológicas, se dentro ou fora do reservatório. Admite-se que a estimativa de evaporação através de uma estação climática flutuante sobre o lago apresente acurácia significativamente melhor sobre a estimativa realizada com base em informações do ambiente terrestre. Estima-se também que as imprecisões na estimativa das variáveis independentes geram elevada incerteza na estimativa de evaporação em reservatórios pelo método do balanço hídrico.

Esse trabalho tem como objetivo geral avaliar a evaporação em um reservatório tropical por diversos métodos. Os objetivos específicos são: (i) avaliar a evaporação do reservatório através do método de Penman (1948) com base em três estações meteorológicas: uma embarcada, uma às margens do lago e outra a 19 km do lago; (ii) estimar a evaporação do reservatório através do balanço hídrico; e (iii) comparar a evaporação estimada pelos diferentes métodos, tendo como referência sensor de alta precisão, cujo princípio é a diferença de pressão em tanque padrão imerso no próprio reservatório.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Evaporação em superfícies livres: importância, definições e fatores determinantes.

A evaporação da água constitui uma das principais componentes do ciclo hidrológico. Através deste, a água é transferida desde a atmosfera até a superfície da terra pela precipitação e retorna à atmosfera pela evaporação. O processo de evaporação em termos gerais consiste na mudança de fase da água líquida para a gasosa (vapor) em superfícies livres de massa de água, e somente poderá ocorrer naturalmente se houver ingresso de energia no sistema, proveniente do sol, da atmosfera ou de ambos e será controlado pela taxa de energia, na forma de vapor de água que se propaga na superfície da terra (CHOW *et. al.*, 1988; TUCCI & BELTRAME, 1993). Pelo princípio da conservação da massa, a evaporação pode ser expressa pela Equação 1.

$$E = \frac{dm}{dt} \quad (1)$$

Na Equação 1, E é a taxa mássica de evaporação (m) e dm é o balanço de massa de líquido que, por unidade de área, passa à fase vapor no intervalo de tempo dt .

O fenômeno de evaporação envolve, simultaneamente, processos de troca de calor e de massa entre a superfície evaporante e sua vizinhança. Por isso, a evaporação é, geralmente, caracterizada pela perda do líquido em resultado da sua vaporização. Em termos continentais, a massa de água constituinte dos lagos (naturais ou artificiais) garante o abastecimento contínuo de umidade ao processo evaporativo, pelo que as perdas reais dependem diretamente dos fatores climáticos e meteorológicos de cada região. Por outro lado, a evaporação é também um processo de arrefecimento que envolve transferências de massa e calor na interface água-ar.

A evaporação ocorre quando a água, recebendo incidência de calor, inicia um processo de aquecimento até que seja atingido seu ponto de ebulição, transformando-se de líquido para gasoso. Prosseguindo a cessão de calor, este não mais atua na elevação da temperatura, mas como calor latente de vaporização. Nesse contexto, moléculas da água líquida cuja energia interna é suficiente para romper a barreira da superfície, entram na atmosfera, enquanto algumas moléculas de vapor de água retornam ao líquido, fazendo o caminho inverso. A quantidade de energia que uma molécula de água líquida precisa para romper a superfície e

evaporar é chamada calor latente de evaporação, que pode ser dado por unidade de massa de água (Equação 2).

$$\lambda = 2,501 - 0,002361 \cdot T_s \quad (2)$$

Na Equação 2, λ é o calor latente de vaporização da água (MJ.kg^{-1}) e T_s é a temperatura da superfície da água em $^{\circ}\text{C}$. A manutenção do processo exige aporte de energia. Na natureza, a principal fonte dessa energia é o sol. Dessa forma, quanto mais energia recebida pela massa líquida, maior é a taxa de evaporação. Assim, a evaporação causa o resfriamento do ambiente, ou seja, a transformação do calor sensível em calor latente, redistribuindo a energia solar absorvida (PEREIRA *et al.* 2013). A taxa de evaporação varia de acordo com os fatores climáticos e da natureza da própria superfície evaporante. Entre os principais fatores climáticos que condicionam a evaporação estão a radiação solar, a temperatura do ar, a umidade relativa, a velocidade do vento e a pressão atmosférica (PENMAN, 1948).

Existe diferença entre a evaporação real e a evaporação potencial. A evaporação real depende da disponibilidade de água na superfície. Por isso, ela é inferior ou igual à evaporação potencial e dificilmente consegue ser mensurada. Já a evaporação potencial é a máxima capacidade que uma superfície de água livre consegue perder água por evaporação, sem restrições do suprimento de água. Dessa forma, a evaporação que ocorre sobre a superfície líquida livre é diferente da que ocorre sobre o solo. Quando o solo está saturado e sob as mesmas condições climáticas de uma superfície de água na sua proximidade, pode-se considerar que a evaporação nos dois meios é aproximadamente igual. No entanto, quando a água do solo começar a secar, a intensidade de evaporação sofre uma redução, tornando-se menos efetiva à medida que a água livre no solo fica mais distante da superfície.

Ao interagir com a superfície da água, uma fração da radiação é refletida e outra é absorvida nas camadas superficiais ou irá penetrar na massa hídrica. A relação entre a radiação incidente e a refletida denomina-se albedo (α) que, para a superfície de água, oscila entre 0,05 e 0,15, sendo o limite superior para água turva. Assim, quanto maior for o albedo, maior será a energia refletida, menor será a energia absorvida pela massa de água e, portanto, menor será a evaporação (MOLLE, 1989). Sendo assim, nem toda a energia radiante gera vaporização da água, já que parte contribui para o aquecimento do ar e outra parte responde pelo aumento de temperatura das águas mais profundas (ALLEN *et al.* 1998).

Quando não há radiação solar para acelerar a energia cinética das moléculas de água, como no período noturno, a evaporação é menor e ocorre exclusivamente em função de

fatores aerodinâmicos, como o vento e o déficit de pressão de vapor d'água. De fato, no período diurno, ambos os processos (troca direta de energia via radiação e aerodinâmicos) são responsáveis pela evaporação, enquanto que à noite somente os últimos atuam. Estudos descrevem que o fluxo de calor sensível é afetado principalmente pela velocidade do vento e pelo déficit de pressão de vapor, sendo este em função da diferença de temperatura entre a água e ar (GOLDBACH & KUTTLER, 2015).

A atmosfera é a camada gasosa que envolve a Terra sendo constituída por ar seco (nitrogênio, oxigênio, argônio, dióxido de carbono, hélio, hidrogênio e ozônio), vapor de água e particulados. As mudanças na composição da atmosfera podem gerar aumento da temperatura, o que interfere diretamente no processo de evaporação. A evaporação varia com a temperatura do ar, à medida que seu aumento permite maior massa de vapor de água no mesmo volume de ar, o que gera maior tensão de vapor de saturação. Como resultado, reduz-se a umidade relativa do ar, incrementando a taxa evaporativa (WARD & TRIMBLE, 2004; VAREJÃO & SILVA, 2006).

A evaporação acentua-se quando aumenta a diferença entre a tensão de saturação de vapor saturado à superfície (e_s) e a tensão de vapor do ar (e_a) na camada imediatamente acima da superfície líquida. A massa de moléculas que se vaporiza depende da sua tensão de vapor, enquanto que a massa de moléculas que retorna ao líquido depende da tensão de vapor do ar ambiente. Desta forma, quanto maior for a diferença entre as tensões de saturação, ou seja, o déficit de saturação, maior massa de moléculas de água são libertadas e, conseqüentemente, maior é a evaporação.

Outro fator climático importante na evaporação são os ventos, que atuam removendo a massa de ar úmido sobrejacente à superfície líquida. Isso cria condições que favorecem a ocorrência de gradientes de tensão de vapor, pois substituem a camada saturada por uma camada de ar não saturada, conseqüentemente, aumentando a taxa de evaporação. Portanto, ao contribuir com a remoção do ar que vai ficando saturado, o vento permite que o processo de evaporação continue ocorrendo. A pressão atmosférica é outro parâmetro meteorológico que influencia o processo da evaporação, afetando diretamente a quantidade de vapor que a atmosfera pode absorver. Mantendo-se em igualdade os restantes fatores uma diminuição da pressão atmosférica conduz a um aumento da evaporação (VILLELA & MATTOS, 1975).

2.2 Estimativa de evaporação

A evaporação pode ser medida através de aparelhos de medição direta (evaporímetros ou tanques), através de registradores (evaporígrafos) ou através de modelos, devidamente parametrizados. Os modelos (físicos ou empíricos) podem ser fundamentados no balanço de energia e/ou no método aerodinâmico, como Penman (1948) e seus derivados. Outro tipo de modelo são aqueles baseados no balanço hídrico dos reservatórios (CHOW *et al.* 1988). Um dos principais problemas na utilização de modelos na estimativa da evaporação é a falta de monitoramento dos dados meteorológicos sobre a superfície do reservatório, bem como medições dos perfis da temperatura da água, que informam a energia armazenada no corpo d'água. Dessa forma, a maioria dos métodos disponíveis estima a evaporação a partir de observações de temperatura, umidade relativa do ar, velocidade do vento e radiação solar ou utiliza medidas de tanques de evaporação alocados em estações meteorológicas no ambiente terrestre (REIS & DIAS, 1998; FONTES, 2005).

2.2.1 Método de Penman

A equação original de Penman (1948) fornece apenas a estimativa de evaporação da água livremente exposta e, segundo Chow *et al.* (1988) está representada na Equação 3.

$$E = \frac{\Delta}{(\Delta + \gamma)} E_r + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} E_a \quad (3)$$

Na Equação 3, γ é o parâmetro psicrométrico ($\text{kPa}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$), Δ corresponde à declividade da curva de tensão de vapor em relação à temperatura do ar ($\text{kPa}\cdot^\circ\text{C}^{-1}$), E_r corresponde ao poder evaporante do ar ($\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$) em função da radiação (balanço energético), E_a corresponde ao poder evaporante do ar ($\text{mm}\cdot\text{dia}^{-1}$) em função das condições aerodinâmicas (velocidade do vento e do déficit de saturação do ar). O primeiro e segundo termos da equação de Penman são comumente chamados de “termo energético” e “termo aerodinâmico”, respectivamente. O êxito da equação de Penman é atribuído à sua robusta base física (LINACRE, 1993; LEITÃO *et al.* 2007; RODRIGUES, 2009; MAJIDI *et al.* 2015).

Rosenberry *et al.* (2007) compararam 15 métodos de evaporação em um pequeno lago no nordeste dos Estados Unidos, adotando o método de balanço de energia-razão de Bowen (BERB) como o padrão. Os métodos de Priestley-Taylor, de Bruin-Keijman e de Penman foram os mais comparáveis com o BERB, com erros médios entre 0,19 e 0,27 mm/dia. Majidi *et al.* (2015) compararam 18 métodos de estimativa de evaporação com o método de balanço de

energia em um reservatório no Iran, e propuseram um ranking baseado no desempenho do melhor para o pior, sendo os métodos de Jensen-Haise, Makkink, Penman e DeBruin os mais consistentes. Rodrigues (2009) estimou a evaporação em diversos reservatórios (*albufeiras*) do sul de Portugal, utilizando dados meteorológicos coletados em estações meteorológicas instaladas dentro de reservatórios. Os resultados de seis métodos de quantificação da evaporação foram comparados com os valores obtidos pelo método de balanço de energia-razão de Bowen (BERB). O método de Penman e do Tanque Classe A mostrou resultados ligeiramente superiores, enquanto que os métodos de Priestley-Taylor, de Thornthwaite e os modelos de FLakee e de transferência de massa mostraram resultados inferiores ao de balanço de energia. As diferenças na evaporação variaram entre 0,1 e 0,3 mm/dia, no semestre úmido e, entre 0,1 e 1,2 mm/dia, no semestre seco. Elsaywaf *et al.* (2010) estimaram a evaporação no Lago Nasser, localizado em uma região árida do sul do Egito, utilizando dados meteorológicos e hidrológicos coletados em estações climatológicas flutuantes. Os resultados de seis métodos convencionais de quantificação da evaporação foram comparados com os valores obtidos pelo método de balanço de energia-razão de Bowen (BERB). O método de Penman mostrou ser o mais favorável na escala diária, enquanto que na escala mensal os métodos de Priestley-Taylor e de de Bruin-Keijman mostraram melhor ajuste. Diferenças na evaporação média por esses métodos variaram entre 0,14 e 0,36 mm/dia.

Entre os estudos sobre evaporação no semiárido brasileiro na última década pode-se destacar o de Leão *et al.* (2013). Os autores avaliaram seis diferentes métodos para a estimativa da evaporação no açude de Banabuiú, Ceará, a fim de avaliar qual o mais adequado para utilização em modelos hidrológicos para o balanço hídrico em reservatórios no Estado do Ceará. Os métodos avaliados foram os propostos por Penman, Kohler-Nordenson-Fox, Priestley-Taylor, de Bruim-Keijman, Brutsaert-Stricker e de Bruim, os quais apresentaram ótimo desempenho quando testados para o balanço hídrico durante a estação seca. O método de Priestley-Taylor mostrou-se o mais adequado, tomando-se como base o balanço hídrico. Viera *et al.* (2016) compararam cinco métodos de estimativas de evaporação aplicados aos reservatórios de Três Marias - MG e Sobradinho - BA e estimaram a evaporação pelo modelo de Penman e a partir de dados de estações meteorológicas (situadas no entorno dos reservatórios e em estação localizada na área da barragem). Os resultados foram estatisticamente diferentes em relação à localização as estações. Campos *et al.* (2018) analisaram o efeito da evaporação em 40 reservatórios superficiais no Ceará, situados na Bacia do Jaguaribe, Ceará, através de um fator adimensional que engloba as três principais variáveis que, devido a esse fenômeno, interferem no rendimento do reservatório: a lâmina evaporada durante a estação seca, a forma

da bacia hidráulica e o deflúvio médio anual. Os resultados mostraram que em média, os grandes reservatórios são mais eficientes que os pequenos, tanto em termos de vazão efetivamente liberada, quanto em termos de perdas por evaporação. Dantas (2017) estimou a evaporação do Açude Castanhão utilizando o método de Penman (1948), através de dados primários, de uma estação climática flutuante instalada sobre o lago do açude e dados secundários de uma estação localizada em ambiente terrestre (PCD – Jaguaribe). Observou que evaporação média na água é aproximadamente 18% maior que a média de evaporação terrestre.

Existem diversos trabalhos de comparação e avaliação dos mais diversos métodos de estimativas de evaporação pelo mundo todo, como por exemplo, Rong *et al.* (2013), Rimmer *et al.* (2009), McJannet *et al.* (2012), Bueno *et al.* (2015), Pereira *et al.* (2009), Leitão *et al.* (2007), Fontes *et al.* (2003), Fontes (2005). Entretanto, não há um consenso claro sobre quais métodos são melhores para empregar quando faltam dados importantes e de longo prazo, como perfil de temperatura, radiação e fluxos de calor, como é o caso da maioria dos reservatórios no Brasil e em outras partes do mundo.

2.2.2 Método do Balanço hídrico

Através do balanço hídrico, ou balanço volumétrico, pode-se estimar a evaporação. O método baseia-se no princípio de conservação da massa aplicado a um determinado volume de controle. Na prática, consiste em efetuar um balanço (Equação 4) no corpo d'água, segundo o qual a variação de acúmulo no volume de controle corresponde à diferença entre as entradas (precipitação direta, escoamento superficial e fluxo subterrâneo) e as de saída (evaporação, infiltração, percolação, retiradas e vertimentos) (WMO, 2012; KAMPF & BURGESS, 2010; DUAN & BASTIAANSEN, 2013).

$$\frac{dV}{dt} = (P + Q + G) - (Q_E + I + R + Q_S) \quad (4)$$

Na Equação 4, dV é a variação do volume de água armazenado, dt é a variação do tempo, P é a vazão gerada pela precipitação direta na superfície livre, Q é a vazão de entrada no sistema por meio dos rios, G é a vazão de aporte pelo fluxo subterrâneo, Q_E é a vazão evaporada do lago, I é a vazão de infiltração mais percolação pela parede da barragem, R é a vazão de retirada de água e Q_S é a vazão vertida (ou *sangrada*). Apesar da simplicidade conceitual deste método, na prática há dificuldades de aplicação devido às incertezas na

quantificação correta dos termos da equação. Entre estes, destacam-se especialmente aqueles relacionados à interação entre águas de superfície e subterrâneas (G e I , Equação 4). Resultam, por isso, dúvidas quanto à sua aplicabilidade e fiabilidade em muitas das situações práticas. Essas incertezas podem deformar a estimativa da evaporação, como atesta Varejão-Silva (2001).

O cálculo do balanço hídrico de um reservatório pode ser feito separadamente nas estações chuvosa e seca, principalmente quando aplicado a regiões fortemente sazonais, como é o caso do Semiárido Brasileiro – SAB (MEDEIROS & DE ARAÚJO, 2014). Isso porque em cada estação há processos nitidamente prevalentes. Por exemplo, a afluência de rios (Q) geralmente ocorre apenas na estação chuvosa (primeiro semestre no SAB), assim como o transbordamento do vertedouro (Q_s), sempre que a capacidade máxima de armazenamento do reservatório é superada. Já na estação seca (segundo semestre no SAB), a vazão de precipitação direta (P) é desprezível e a grande maioria dos rios seca ($Q = 0$). Quando há vazão nos rios, frequentemente essas ocorrem por causa da liberação de água nos reservatórios localizados a montante. Na estação seca, prevalece a evaporação (E), que se torna o processo dominante. Nessa condição, a depleção de volume dos reservatórios ($dV/dt < 0$) ocorre devido a três processos simultâneos de difícil separação: evaporação, infiltração e retiradas diretas / indiretas (DE ARAÚJO *et al.* 2006).

Alguns estudos que utilizaram o método do balanço hídrico na estimativa da evaporação em reservatórios. Entre eles podemos citar o estudo de Fontes (2005), que estimou a evaporação no reservatório Nenezinho, localizado em região semiárida do centro-leste da Bahia. Foram utilizados seis métodos de estimativa da evaporação, sendo estes: o Método do Balanço de Energia, de Penman, de Priestley e Taylor, da relação complementar proposto por Morton, do balanço hídrico e evaporímetro tipo tanque classe A. A aplicação do método do balanço hídrico foi realizada no intervalo de tempo mensal durante o período seco, no qual não há afluência dos rios no reservatório, como também, no que se refere à infiltração esta foi desprezada nos cálculos do balanço hídrico do reservatório. Ao comparar os resultados obtidos pelos métodos os do balanço hídrico foram superiores aos demais, coerente com a consideração que nesses valores estão embutidas as perdas eventuais por retiradas de água para atendimento à demanda e possível infiltração ocorrida na área do reservatório. Borges (2017) estimou a evaporação em reservatórios artificiais utilizados para irrigação revestidos por manta de polietileno de alta densidade em uma área experimental, localizada na Fazenda Santo Antônio, Bahia. O método do balanço hídrico foi aplicado em dois reservatórios da área experimental, por meio da instalação de um transdutor de pressão em cada um deles. Durante as medições

não houve bombeamento de água para irrigação. A medição da evaporação da água pelo método do balanço de massa com leitura automática do nível d'água via transdutor de pressão revelou-se numa opção prática e de fácil aplicação. Considerando a robustez do instrumento e a boa resolução das leituras (0,35 mm), sendo um método confiável para determinação da evaporação em reservatórios artificiais onde as perdas por infiltração são mínimas.

2.2.3 Método de Diferença de Pressão

O método de diferença de pressão é um método de medição direta da evaporação com base em um sensor de precisão acoplado a um tanque imerso, padronizado pela Organização Meteorológica Mundial – WMO. O sensor mede a pressão hidrostática exercida pela coluna d'água dentro do tanque, assim como a pressão atmosférica local. Utilizando-se a Equação 5 é possível calcular com grande precisão as alterações de nível dentro do tanque. Por meio do balanço hídrico simplificado (Equação 4 com as seguintes simplificações: $Q = G = I = R = Q_s = 0$), pode-se estimar com elevada precisão a taxa de evaporação E .

$$\Delta H = \frac{\Delta p}{\rho \cdot g} \quad (5)$$

Na Equação 5, Δp é a diferença entre a pressão hidrostática, exercida pela coluna d'água, e a pressão atmosférica; ρ é a massa específica da água; g é a aceleração da gravidade; e H é a altura da coluna d'água. A pressão vai sendo modificada com a alteração da coluna d'água ao longo do dia. Dessa forma, ao medir automaticamente a pressão hidrostática exercida pela coluna d'água e a precipitação ao longo do dia, obtém-se a lâmina evaporada. Recomenda-se a presença de uma estação meteorológica a pequena distância do tanque, capaz de informar com precisão eventuais aportes de água por precipitação.

3 ÁREA DE ESTUDO

O Reservatório Gavião (Figuras 1 e 2) é a área do estudo e está localizado na Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), entre os municípios de Pacatuba e Itaitinga, estado do Ceará. O açude possui capacidade de 33,3 hm³ (CEARÁ, 2008) e integra a rede da Bacia Metropolitana. O suprimento de água para a RMF, inicialmente, era realizado pelo sistema integrado Pacoti-Riachão-Gavião. Posteriormente, em 1993, com a criação do Canal do Trabalhador, as águas do açude Orós e rio Jaguaribe começaram a ser transportadas para o açude Pacajus e aduzidas para o sistema integrado citado acima. Em 2004, com a conclusão das obras do Castanhão, o rio Jaguaribe passou a ser perenizado por este manancial. Já em 2012, com a conclusão do Eixão das Águas, o sistema Pacoti-Riachão-Gavião passou a receber, também, volume direto do açude Castanhão. Estes reservatórios são interligados por meio de rios perenizados, canais, sifões, túneis e adutoras, conforme mostra a Figura 3.

A barragem foi construída pelo DNOCS em 1973 para complementar a rede de abastecimento de água potável da Região Metropolitana de Fortaleza (RMF), que abastece os municípios de Fortaleza, Caucaia, Maracanaú, Eusébio e o complexo portuário e industrial do Pecém, cuja fonte hídrica é o conjunto de reservatórios Orós, Castanhão, Pacajus, Pacoti, Riachão e Gavião, integrados em série, e pelo Canal do Trabalhador. Esses reservatórios, integrados ao Açude Acarape do Meio, também abastecem os municípios de Maranguape, Guaiúba e Pacatuba (ANA, 2010; CEARÁ, 2008).

Figura 1 – Visão do Reservatório Gavião a partir da estação de bombeamento EB0.

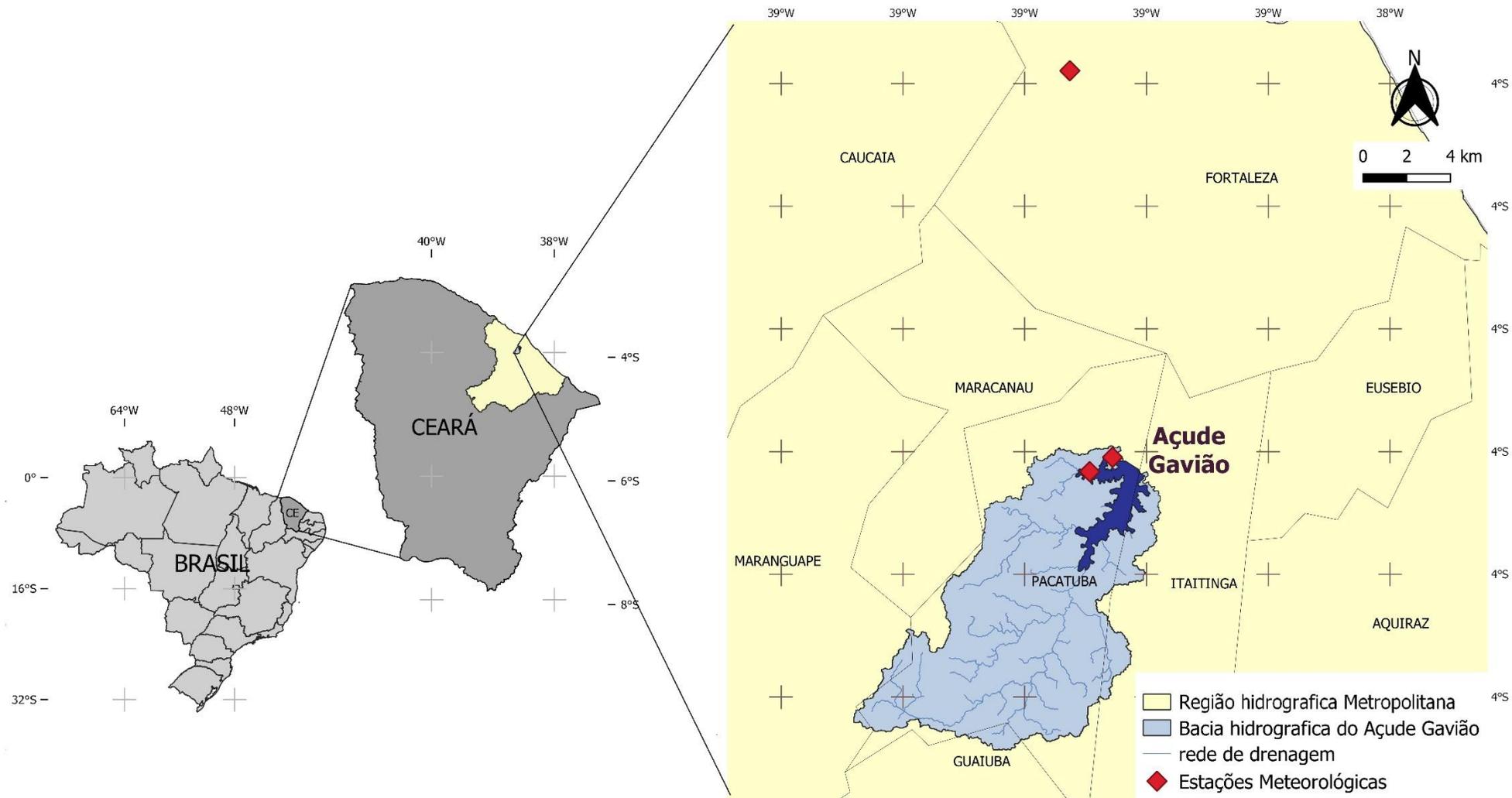


Fonte: autora (2018).

A bacia hidrográfica do Açude Gavião (Figura 2) drena uma área de 97 km², possuindo como principal contribuinte o rio Cocó, bem como os seguintes afluentes: Água Fria, Alegrete, do Gavião, Pacatuba e Salgado. A região na qual a bacia está inserida possui clima tropical quente subúmido, que se caracteriza, predominantemente, por ser quente e estável, com temperaturas anuais médias que variam entre 26°C e 28°C. A região tem elevada insolação,

variando de 2.650 a 3.000 h.ano⁻¹, o que lhe confere um alto potencial evaporante. Caracteriza-se principalmente pela concentração das chuvas no primeiro semestre do ano, com a estação chuvosa estendendo-se, historicamente, entre os meses de janeiro a maio. O segundo semestre é quente e seco, caracterizado pela estiagem (FUNCEME, 2009; CEARÁ, 1999).

Figura 2 – Mapa de localização do Reservatório Gavião, local da pesquisa.



Fonte: autora.

Figura 3 – Percurso do Eixão das Águas que liga o Açude Castanhão ao Sistema integrado Pacoti-Riachão-Gavião.



Fonte: CEARÁ, 2016.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Aquisição de dados meteorológicos

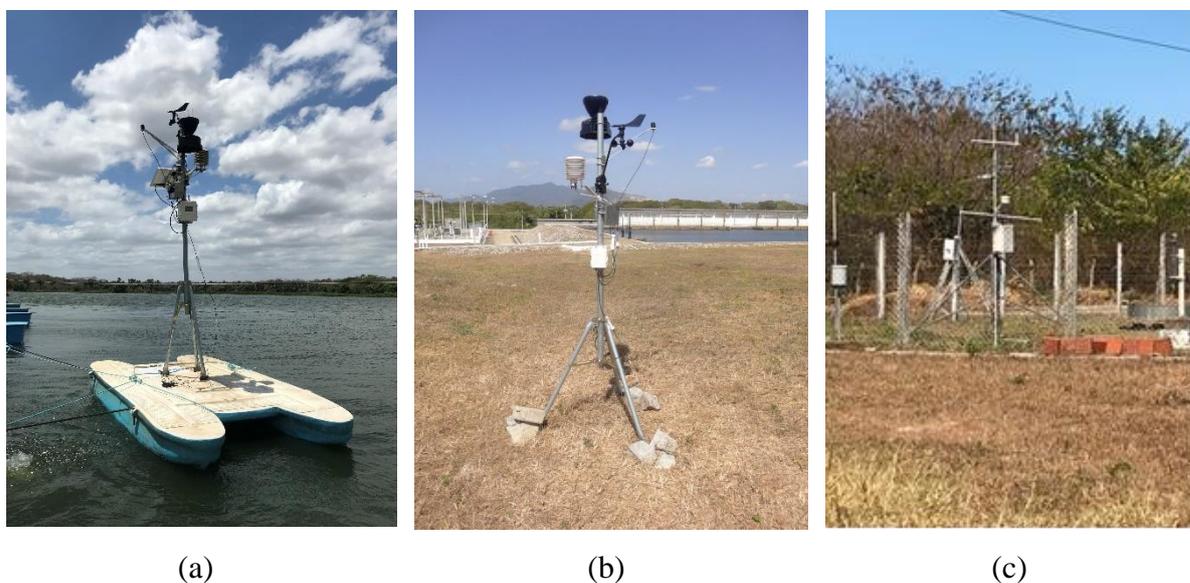
Os dados meteorológicos utilizados neste trabalho para o cálculo da evaporação foram obtidos através de duas estações meteorológicas automáticas (EMA), sendo uma instalada dentro do reservatório, embarcada em uma estrutura flutuante, e uma instalada no entorno do reservatório em ambiente terrestre a cerca de 400 m do espelho d'água; e uma estação meteorológica convencional (EMC) instalada no Campus do Pici da UFC, em Fortaleza, a 19 km do espelho d'água do reservatório.

Tabela 1 – Informações sobre as estações meteorológicas utilizadas.

Estação	Latitude (graus)	Longitude (graus)	Altitude (m)	Distância do espelho d'água
Estação Automática embarcada	-3,908	-38,573	37	Sobre o espelho (zero)
Estação Automática próxima	-3,902	-38,564	52	400 m
Estação Convencional distante	-3,745	-38,581	20	19.000 m

Na Figura 4 encontram-se as fotos das estações meteorológicas utilizadas no trabalho.

Figura 4 – Estações meteorológicas utilizadas no trabalho (a) estação automática instalada sobre o espelho d'água (b) estação meteorológica automática instalada às margens do açude (c) estação meteorológica convencional instalada no Campus do Pici.



A escolha do local da instalação da estação embarcada obedeceu aos seguintes critérios: i) segurança da estação flutuante; e ii) proximidade do monitoramento do sensor de pressão. Quanto à escolha da estação sobre terra, foi realizado um levantamento das possíveis estações do entorno do Gavião e da confiabilidade dos dados para o ano de 2019, apresentados por estas estações. Para este trabalho, selecionou-se a estação localizada no município de Fortaleza, tendo esta, todos os critérios acima. Em cada estação automática foram obtidos dados em cada 5 minutos de temperatura máxima, mínima e média, umidade relativa do ar, velocidade do vento, precipitação pluvial e radiação solar global. Já da estação convencional foram obtidos dados sinóticos de observação às 12, 18 e 24 UTC de temperatura máxima, mínima e média, umidade relativa do ar, velocidade do vento, precipitação pluvial e insolação. Os períodos selecionados para cada estação tiveram como base a simultaneidade de coletas, desta forma, o período estudado foi de 11 de outubro de 2019 a 11 de dezembro de 2019.

4.1.1 Validação dos dados das estações meteorológicas automáticas

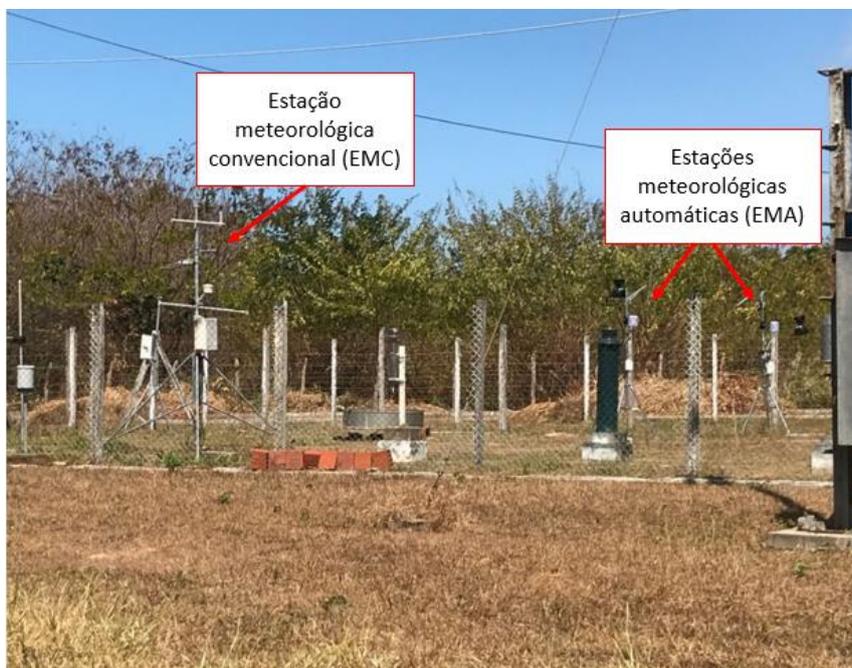
A estimativa da evaporação por meio da Equação 3, de Penman, está diretamente relacionada à qualidade dos dados climatológicos em que se baseia. O uso de EMA fornece um sistema completo de informações meteorológicas de modo prático e funcional, mas além da observação permanente do funcionamento dos aparelhos eletrônicos, é necessária uma análise para avaliar a integridade dos dados, sua qualidade e sua confiabilidade antes de serem utilizados nas equações de estimativa da evaporação (TURCO & BARBOSA, 2008).

Para que as séries de dados das estações automáticas (EMA 1 e EMA 2) sejam validadas, há a necessidade de estudos comparativos entre as duas estações e entre estas e uma estação convencional (EMC) no mesmo local e no mesmo tempo. Dessa forma, foi realizada a validação das estações meteorológicas automáticas através da comparação dos dados diários obtidos na Estação Meteorológica Convencional (EMC) do Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Ceará com os dados obtidos das estações automáticas, instaladas no Campus do Pici, na cidade de Fortaleza, a 3° 45' de latitude sul e 33° 38' de longitude oeste e 20 m de altitude no período de 11 de novembro a 30 de novembro de 2018.

Os dados meteorológicos avaliados foram obtidos em estações meteorológicas: convencional (EMC) e automáticas (EMA 1 e EMA 2), que operavam simultaneamente na mesma área, conforme mostra a Figura 5, sendo avaliados: as temperaturas máxima, mínima e média do ar (°C), a velocidade média do vento ($m.s^{-1}$) a 2 m (EMA 1 e EMA 2) e a 10 m (EMC) de altura, a umidade relativa do ar (%), a precipitação diária (mm) e a radiação solar global

($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) através do heliógrafo (EMC) e através do sensor de radiação global da Onset modelo S-LIB-M003.

Figura 5 – Estações meteorológicas convencional (EMC) e automáticas (EMA) instaladas no Campus do Pici, Fortaleza, Ceará. Foto obtida no dia 12 de novembro de 2018.



Fonte: autora.

Foram utilizados os dados obtidos durante o período de vinte dias, de 11 de novembro de 2018 a 30 de novembro de 2018. As observações meteorológicas na EMC foram feitas nos horários sinóticos de observação às 12, 18 e 24 UTC (Unidades de Tempo Coordenado), enquanto que, nas EMAs, leituras eram registradas a cada cinco minutos, processadas e armazenadas por um “datalogger”.

A velocidade do vento a 10 m na EMC foi convertida para velocidade do vento a 2 m, baseada na lei logarítmica que descreve a distribuição da velocidade longitudinal de um fluxo turbulento de fluido próximo a um limite. A equação para tais perfis de fluxo de camada de limite (ou equação de Prandtl-von Kármán, *apud* CHOW *et al.*, 1988) é dada pela Equação 6.

$$u_z = \frac{u^*}{k} \cdot \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (6)$$

Na Equação 6, z é a altura acima da superfície; u_z é a velocidade média do vento no nível z ; z_0 é o parâmetro de rugosidade da superfície; k é a constante de von Kármán ($k \approx 0,40$); e u^* é a velocidade de fricção dada pela Equação 7:

$$u^* = \sqrt{\frac{\tau}{\rho_{vento}}} \quad (7a)$$

$$u_z = 0,3384 u^* + 0,9155 \quad (7b)$$

Nas Equações 7, τ é a tensão de cisalhamento no limite do fluxo e ρ_{vento} é a massa específica do vento. Desta forma, a velocidade do vento a 10 m foi convertida a 2 m baseada nas Equações 6 e 7. É possível gerar uma relação linear entre as velocidades do vento a 10 m e a 2 m (Equação 7b). Os elementos constituintes da EMC e das EMA são apresentados na Tabela 2. A Tabela 3 apresenta a comparação na forma de obtenção dos dados meteorológicos absolutos e médios, a partir da EMC e das EMAs.

Tabela 2 – Características dos sensores das estações meteorológicas: convencional (EMC) e automáticas (EMA 1 e EMA 2).

Estação	Variáveis	Precisão	Sensor (marca/modelo)
Automática (EMA 1 e EMA 2)	Precipitação (báscula)	±4%	Onset/S-RGF-M002
	Velocidade do vento	± 1.1m/s	Onset/S-WCF-M003
	Temperatura do ar	±0.21°C	Onset/S-THB-M002
	Radiação solar	±10W/m ²	Onset/S-LIB-M003
	Umidade do ar	± 2.5%	Onset/S-THB-M002
Convencional (EMC)	Temperatura máxima	0.2°C	Mercúrio
	Temperatura mínima	0.2°C	Álcool
	Temperatura (Bulbo seco e úmido)	0.1°C	Mercúrio
	Velocidade do vento	-	Conjunto de 3 canecas
	Insolação	0.1h	Heliógrafo
	Precipitação	0.1mm	Pluviômetro

Tabela 3 – Comparação entre as formas de obtenção dos dados meteorológicos absolutos e médios das estações meteorológicas convencional (EMC) e automáticas (EMA 1 e EMA 2).

Variável	EMC	EMA
Temperatura Média	$\frac{T_{max} + T_{min} + T_{9:00} + 2T_{21:00}}{5}$	$\frac{\sum T_i^*}{288}$
Temperatura Máxima	Leitura às 21:00	Maior valor das 24 h
Temperatura Mínima	Leitura às 9:00	Menor valor das 24 h
Umidade Relativa	$\frac{UR_{9:00} + UR_{15:00} + 2UR_{21:00}}{4}$	$\frac{\sum UR_i^*}{288}$
Velocidade do Vento	Média Diária	$\frac{\sum V_i^*}{288}$
Precipitação do dia n+1	Leitura às 9:00	Somatório das chuvas coletadas desde 9:00 do dia até as 9:00 do dia seguinte
Radiação solar global	calculada pela equação	$\frac{Qg_{5:00h} + \dots + Qg_{19:00h}^*}{169}$

*medidas obtidas a cada 5 minutos.

4.2 Estimativa da evaporação

A estimativa da evaporação no reservatório Gavião foi realizada com base nos dados meteorológicos citados no item 4.1. O cálculo foi realizado com base nas seguintes metodologias: modelo de Penman (1948), balanço hídrico e sensor de diferença de pressão. Foram obtidos três resultados de evaporação baseados no modelo de Penman para o reservatório: cada um estimado com os dados fornecidos por uma das três estações meteorológicas.

4.2.1 Método de Penman

Para estimar a evaporação foi utilizada a forma particular (Equação 8: ROSENBERRY *et al.* 2007) da equação geral de Penman (Equação 3).

$$E \text{ (mm. d}^{-1}\text{)} = 86,4 \frac{\Delta}{(\Delta + \gamma)} \cdot \left(\frac{R_n}{\lambda \cdot \rho} \right) + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} \cdot (0,26 (0,5 + 0,54u_2))(e_s - e_a) \quad (8)$$

Na Equação 8, Δ é a declividade da curva de tensão de vapor, (kPa. °C⁻¹, ver Equação 9); γ é o parâmetro psicrométrico, (kPa. °C⁻¹); R_n é o saldo de radiação, (W. m⁻²); λ é o calor latente de vaporização, (MJ.kg⁻¹); ρ é a massa específica da água (kg.m⁻³); u_2 é a velocidade do vento tomada 2 m acima da superfície, (m.s⁻¹); e_s é a tensão de vapor saturado à temperatura do ar, (kPa); e e_a é a tensão de vapor de ar, (kPa). Para converter a evaporação em mm.d⁻¹ utiliza-se o fator 86,4 como multiplicador dos termos da equação, demonstrado na Equação 9 (ROSENBERRY *et al.* 2007). Para a obtenção dos parâmetros da Equação 8, seguiu-se a metodologia descrita por Chow *et al.* (1988), Allen *et al.* (1998), Reis & Dias *et al.* (1998), Rodrigues (2009), em que a declividade da curva de tensão de vapor para a temperatura média do ar (Δ) é obtida pela seguinte equação:

$$\Delta \text{ (kPa. } ^\circ\text{C}^{-1}\text{)} = \frac{4098 \left[0,6108 \cdot \exp\left(\frac{17,27 \cdot T_a}{237,3 + T_a}\right) \right]}{(237,3 + T_a)^2} \quad (9)$$

Na Equação 9, T_a é a temperatura do ar, em graus Celsius (°C). Para o cálculo do parâmetro psicrométrico (γ) é utilizada a Equação 10, em que C_p é o calor específico do ar a pressão constante, K_H e K_W são os coeficientes de difusão turbulenta, respectivamente, para o calor e para o vapor de água, λ é calor latente de vaporização (MJ.kg⁻¹), ρ é densidade da água (1000 kg.m⁻³). O pressuposto mais importante é que K_H e K_W sejam aproximadamente iguais, sendo K_H/K_W normalmente considerado 1. Desta forma, o parâmetro psicrométrico (γ) é aproximadamente 0,06708 kPa.°C⁻¹ (CHOW *et al.*, 1988). O saldo de radiação (R_n , W.m⁻²) pode ser calculado pela Equação 11, em que R_{nl} é o saldo de radiação de ondas longas, dado em W. m⁻².

$$\gamma \text{ (kPa. } ^\circ\text{C}^{-1}\text{)} = \frac{C_p K_H \rho}{0,622 \lambda K_W} \quad (10)$$

$$R_n \text{ (W. m}^{-2}\text{)} = R_{ns} - R_{nl} \quad (11)$$

O saldo de ondas curtas (R_{ns}) foi calculado com base na Equação 12, em que α é o albedo da água e R_s é a radiação solar global, (W.m⁻²). O saldo de ondas longas (R_{nl}) foi calculado com base na Equação 13, em que T é a temperatura do ar, em graus Kelvin (K); e_a é a tensão de vapor do ar, em (kPa); n é a insolação, em horas; e N é o fotoperíodo, em horas. Para o cálculo da radiação solar global (R_s) da estação convencional foi utilizada a Equação 14, conforme a metodologia sugerida por Angstrom (1924).

$$R_{ns}(W \cdot m^{-2}) = (1 - \alpha) \cdot R_s \quad (12)$$

$$R_{nl}(W \cdot m^{-2}) = - \left[4,903 \cdot 10^{-9} \cdot T_a^4 (0,34 - 0,14\sqrt{e_a}) \left(0,1 + 0,9 \frac{n}{N} \right) \right] \quad (13)$$

$$R_s = Q_o \cdot \left(w + y \cdot \frac{n}{N} \right) \quad (14)$$

Na Equação 14, R_s é a radiação solar global; Q_o é a radiação no topo da atmosfera; w e y são os parâmetros de Angstrom, sendo considerados $w = 0,2608$ e $y = 0,3092$ de acordo com Aguiar *et al.* (1999) para a região metropolitana de Fortaleza. A radiação no topo da atmosfera (Q_o) é dada pela Equação 15, que depende da latitude em radianos (φ), da correção da excentricidade da órbita terrestre (dr) (Equação 16), da declinação solar (δ) (Equação 17) e do ângulo solar (ω_s) (Equação 18).

$$Q_o(MJ \ m^{-2}d^{-1}) = 37,6 \cdot dr \cdot [(\omega_s \cdot \sin \varphi \cdot \sin \delta) + (\cos \varphi \cdot \cos \delta \cdot \sin \omega_s)] \quad (15)$$

$$dr(adimensional) = 1 + 0,033 \cos \left[\frac{2 \cdot \pi \cdot dj}{365 + BI} \right] \quad (16)$$

$$\delta(rad) = 0,4093 \cdot \sin \left[\frac{2 \cdot \pi \cdot (284 + dj)}{365 + BI} \right] \quad (17)$$

$$\omega_s(rad) = \arccos(-\tan \varphi \cdot \tan \delta) \quad (18)$$

Nas Equações 16 e 17, dj é o dia de acordo com o calendário Juliano e BI representa o ano bissexto. A tensão de vapor saturado à temperatura média da superfície (e_s) é obtida pela Equação 19. A tensão de vapor do ar (e_a) pode ser obtida a partir da Equação 20, em que HR é a umidade relativa do ar (%).

$$e_s(kPa) = 6,108 \cdot \exp \left(\frac{17,27 \cdot T_a}{237,3 + T_a} \right) \quad (19)$$

$$e_a(kPa) = e_s \cdot \frac{HR}{100} \quad (20)$$

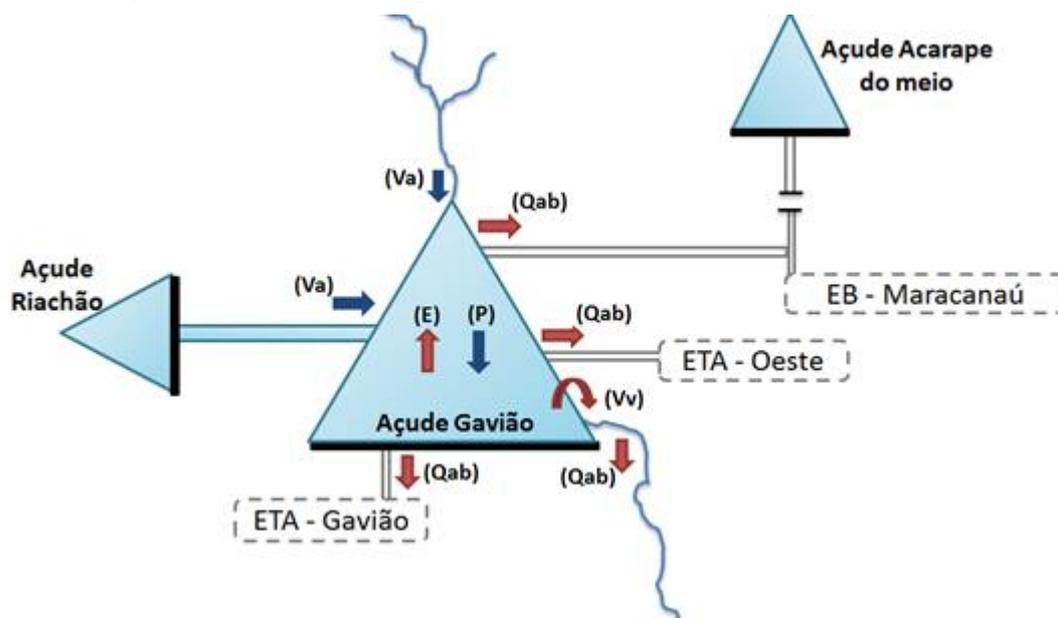
Chow *et al.* (1988) afirmam que a aplicação das equações acima apresentadas oferece bons resultados para o cálculo da evaporação de reservatórios quando toda a informação meteorológica necessária se encontra disponível e todos os pressupostos estabelecidos por Penman (1948) se verificam. As principais suposições do balanço de energia são a prevalência de um fluxo de energia constante e variações não significativas de água durante o período de tempo em análise. Estes pressupostos limitam a aplicação das equações combinadas a intervalos

de tempo iguais ou superiores ao dia e a situações que não envolvam grandes capacidades de armazenamento de calor.

4.2.2 Método do Balanço Hídrico

No reservatório Gavião os componentes do balanço hídrico estão esquematizados na Figura 6.

Figura 6 – Esquematização dos componentes do balanço hídrico no reservatório Gavião.



Fonte: autora.

No presente trabalho, o balanço hídrico foi calculado apenas na estação seca, devido à falta de dados confiáveis da vazão afluyente do Rio Cocó. No período seco, entretanto, a vazão proveniente do Rio Cocó é desprezível, tendo sido admitida como zero. Devido à falta de estações fluviométricas na seção do Rio Cocó, não há informações disponíveis e os métodos para medida desta se tornam inviáveis ao estudo. Desta forma, a vazão de afluência ao reservatório no período seco decorre unicamente da vazão transferida dos reservatórios Riachão-Pacoti. Também no período seco, a vazão vertida do reservatório foi nula, conforme se constatou *in situ*. Desta forma a equação do balanço hídrico (Equação 4) pode ser simplificada e utilizada para a estimar a vazão evaporação (Equação 21) e a taxa de evaporação diária (Equação 22).

$$Q_E = Q_{ENT} - \left(\frac{dV}{dt} + R + I \right) \quad (21)$$

$$E = \frac{Q_E}{A_{lago}} \quad (22)$$

Nas Equações 21 e 22, Q_E é a vazão evaporada do reservatório; Q_{ENT} é a vazão que entra no reservatório; R é a vazão retirada de água do reservatório; I é a vazão infiltração mais percolação pela parede da barragem; e A_{lago} é a área do reservatório. A vazão de entrada no reservatório (Q_{ENT}) é dada pela Equação 23, em que Q_{CANAL} é a vazão regularizada que entra no Gavião pelo canal de interligação deste com o Pacoti-Riachão; e P é vazão gerada pela precipitação direta na superfície livre.

$$Q_{ENT} = Q_{CANAL} + P \quad (23)$$

Molle & Cadier (1992) observaram que a vazão específica de infiltração (ou seja, por unidade de área) nos reservatórios semiáridos do Brasil é igual a 1/3 da evaporação do tanque classe A. Admite-se, também, que a taxa de evaporação é cerca de 0,70 vezes a evaporação do tanque classe A (MAMEDE *et al.* 2012). Calculando-se a divisão dessas duas razões, conclui-se que, em média, a infiltração é metade da evaporação. No âmbito da presente pesquisa, admite-se que a infiltração varia desde zero (CAMPOS, 2010) a 100% da evaporação, de modo que a média seja próxima a 50% da taxa evaporativa. Desta forma, a vazão de evaporação máxima é dada pela Equação 24, que pressupõe infiltração nula.

$$Q_{E,MÁX} = Q_{ENT} - \left(\frac{dV}{dt} + R \right) \quad (24)$$

Substituindo-se, na Equação 21, a vazão de infiltração (I) pela infiltração máxima admitida (isto é, igual à taxa de evaporação), obtém-se vazão evaporada mínima, dada pela Equação 25.

$$Q_{E,MÍN} = \frac{Q_{ENT} - \left(\frac{dV}{dt} + R \right)}{2} \quad (25)$$

Os dados de volume do reservatório e de sua área inundada são disponibilizados diariamente pela COGERH através do Portal Hidrológico. A curva cota-área-volume (CAV) foi modelada por ajuste de um polinômio de segundo grau com base nos dados morfológicos de projeto, disponibilizados pela Cogeh.

A vazão regularizada ao Gavião vinda do Pacoti-Riachão se dá através de um canal natural, o qual foi esculpido em rochas, conforme mostra a Figura 7a, e o controle da passagem de água se dá através de duas comportas submersas. A abertura das comportas se dá por um operador que controla a porcentagem de abertura destas (Figura 7b) conforme designado pela COGERH.

Figura 7 – Infraestrutura de transferência de água entre os açudes Riachão e Gavião. (a) Canal que transpõe água do Açude Riachão para o Açude Gavião e (b) válvula de abertura da comporta do canal que interliga as águas do Açude Riachão ao Açude Gavião.



(a)



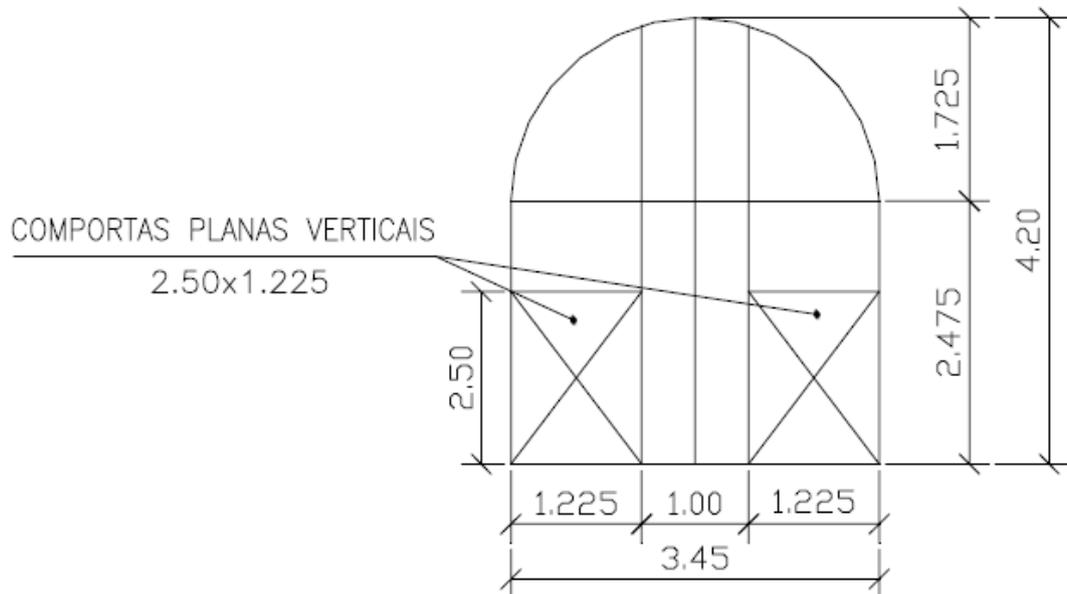
(b)

Fonte: autora (2018).

A interligação entre os açudes do Riachão e Gavião se dá por um canal esculpido em rocha e um túnel que funciona totalmente afogado com seção conforme Figura 8, revestida em concreto em uma extensão de 1075 metros e dotada de comportas tipo vagão. Registre-se que, por um túnel secundário, paralelo ao túnel primário, escoia uma vazão média de $0,8 \text{ m}^3/\text{s}$. Com base na Equação 26, de Darcy-Weisbach, admitiu-se que a vazão do túnel secundário é diretamente proporcional à do túnel principal, posto que a perda de carga total (ΔE) é a mesma,

dada pelo desnível hídrico entre os dois reservatórios (Riachão e Gavião). A constante de proporcionalidade foi calibrada de modo que a vazão média fosse igual a 0,8 m³/s.

Figura 8 – Seção do túnel que interliga os reservatórios Riachão e Gavião.



A vazão que passa pelo canal não é medida diariamente, entretanto foram feitas algumas campanhas de medição de vazão no canal. Nesta pesquisa, utilizamos os dados de seis campanhas de medições de vazão no canal que interliga o Gavião e o Pacoti-Riachão para calibrar a perda de carga localizada das comportas e então estimar, a partir da equação de perda de carga de Darcy-Weisbach (Equação 28), a vazão regularizada ao Gavião vindo pelo canal do Pacoti-Riachão.

$$\Delta E = \left(f \cdot \frac{L}{D_i} + \Sigma k \right) \cdot \frac{u^2}{2g} \quad (26)$$

Na Equação 26, ΔE é perda de carga ao longo do comprimento do túnel dada pela diferença de cota entre o Riachão e o Gavião; f é o fator de atrito de Darcy-Weisbach calculado conforme a Equação 29; L é o comprimento do túnel; D_i é o diâmetro equivalente do túnel; Σk é a soma dos fatores de perda de carga localizada, sendo o somatório do efeito das comportas (K_c) – Equação 29 – e da saída do túnel para o canal ($K_s = 1$); u é a velocidade média da água no túnel; e g é a aceleração da gravidade ($g = 9,81$ m/s). O fator de atrito (f) de Darcy-Weisbach

é adimensional e foi calculado através da equação de Swamee-Jain (Equação 27), na qual f é dado em função da rugosidade absoluta (ε) e do número de Reynolds (Equação 28).

$$f = \left\{ \left(\frac{64}{Rey} \right)^8 + 9,5 \cdot \left[\ln \left(\frac{\varepsilon}{3,7 \cdot D_i} + \frac{5,74}{Rey^{0,9}} \right) - \left(\frac{2500}{Rey} \right)^6 \right]^{-16} \right\}^{0,125} \quad (27)$$

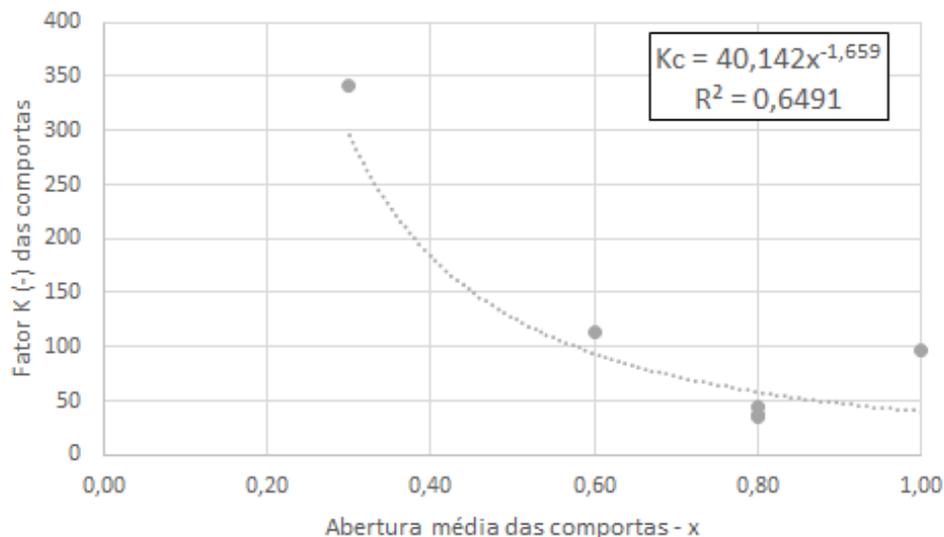
Na Equação 27, Rey é o número de Reynolds; ε a rugosidade absoluta do túnel. O número de Reynolds é dado pela Equação 28.

$$Rey = \frac{u \cdot D_i}{\nu} \quad (28)$$

Na Equação 28, ν é a viscosidade cinemática da água ($10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$). A partir dos dados de vazão medida e dos parâmetros do túnel foi então calibrada a perda de carga da comporta (K_c) utilizando a equação de perda de carga de Darcy-Weisbach, sendo encontrada relação entre a abertura média das comportas e a perda de carga localizada das comportas (K_c) apresentada na Figura 9, conforme mostra a Equação 29, em que x é a abertura média das comportas. Dessa forma, a vazão regulariza do Pacoti-Riachão para o Gavião é estimada a partir da Equação 30. A velocidade é, portanto, calculada a partir da Equação 31.

$$k_c = 40,142 \cdot x^{-1,659} \quad (29)$$

Figura 9 – Relação entre a abertura média das comportas e do Fator K_c de perda de carga das comportas.



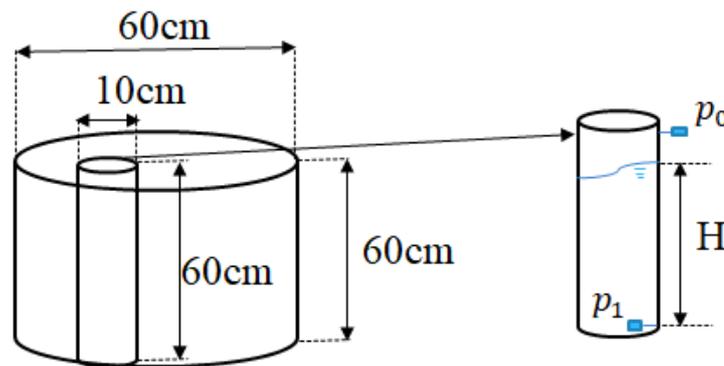
$$Q_{canal} = u \cdot A_{tunnel} \quad (30)$$

$$u = \sqrt{\frac{\Delta E \cdot 2g}{(f \cdot \frac{L}{D_i} + \sum k)}} \quad (31)$$

4.2.3 Método de diferença de pressão

Para estimar a lâmina evaporada pelo método de diferença de pressão foi instalado no reservatório Gavião um sensor de pressão com elevada precisão (0,1 mm) acoplado a um tanque evaporimétrico imerso nas águas do próprio reservatório. A coleta dos dados de pressão hidrostática é feita a cada 10 minutos. A partir da Equação 5, é calculada a altura d'água. A estação meteorológica embarcada encontra-se a apenas 5 m do tanque evaporimétrico, de modo que eventuais precipitações no local são medidas com precisão. O esquema do sensor e do tanque é demonstrado na Figura 10.

Figura 10 – Esquema do sensor de pressão acoplado ao tanque.



O tanque evaporimétrico no qual o sensor foi acoplado foi confeccionado em chapa de aço inoxidável com as seguintes dimensões: 60 cm de diâmetro e 60 cm de profundidade, com um tanque tranquilizador do mesmo material com: 10 cm de diâmetro e 60 cm de profundidade, considerando as recomendações da WMO (2018). Este foi instalado imerso no reservatório Gavião (ambiente aquático) preso a estruturas flutuantes que já havia no local (Figura 11). A escolha do local de instalação do tanque se deu devido às condições de estabilidade necessárias para medidas do sensor, como proteção de ventos. De fato, ventos muito fortes poderiam produzir ondas e invalidar as medidas, além de balançar o tanque e interferir nas medidas. As medidas de pressão da coluna d'água foram feitas dentro do tanque

tranquilizador cilíndrico, enquanto que as medidas de pressão atmosféricas foram realizadas em uma caixa instalada sobre um dos flutuadores azuis (Figura 11).

Figura 11 – Tanque com o sensor de pressão imerso nas águas do Reservatório Gavião e preso a quatro flutuadores (estruturas azuis).



Os dados de pressão foram coletados, armazenados em um banco de dados e disponibilizados no portal de dados ecoDatanet da UTK - EcoSens GmbH Zeitz – na página www.ecodatanet.de/logout.htm?sid=WJ8sJGSIOEcEgpw1XXEmBQ. O envio de dados do sensor para o ecoDatanet se dá pela rede GSM de telefonia móvel. O ecoDatanet é um sistema de armazenamento de dados ambientais sem fios através da Internet. A aquisição de dados é totalmente automática, todos os dados (gráficos e arquivos compatíveis com Excel) podem ser acessados mundialmente com qualquer PC através da Internet, sem software especial. Os dados do sensor de pressão são medidos em milímetro. Também através deste sensor é possível estimar a taxa e a lâmina total de evaporação diária, considerando o período diurno (de 06:00 às 18:00) e noturno (de 18:00 às 06:00 do dia seguinte).

4.3 Análise dos dados

A comparação das taxas de evaporação obtidas pelos diversos métodos experimentais em relação às taxas obtidas pelo método de diferença de pressão foi feita por meio do ajuste de regressão linear simples. Para analisar a acurácia dos métodos, utilizou-se o coeficiente de determinação (R^2) e o coeficiente de correlação de Pearson (r). A exatidão das

estimativas, que está relacionada com o afastamento dos valores estimados com relação aos observados, foi avaliada através do índice de concordância (d) de Willmott et al. (1985) (Equação 32). O desempenho de cada método foi avaliado através do índice de desempenho (c) proposto por Camargo e Sentelhas (1997). O índice de desempenho corresponde à multiplicação do coeficiente de Pearson (r) pelo de concordância (d) (Equação 33). O desempenho do método é considerado melhor, quanto mais próximos de um forem os valores R^2 , d, e c.

a) Índice de concordância (d):

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n [(|P_i - \bar{O}|) + (|O_i - \bar{O}|)]^2} \quad (32)$$

Na Equação 32, P_i são os valores simulados (ou os valores a serem comparados); O_i são os valores de referência ou padrão (os de maior precisão e confiabilidade); e \bar{O} a média dos valores de referência.

b) Índice de desempenho (c):

$$c = r \cdot d \quad (33)$$

A avaliação quantitativa e qualitativa do índice de desempenho foi realizada conforme classificação listada na tabela abaixo (CAMARGO & SENTELHAS, 1997).

Tabela 4 – Avaliação do índice de desempenho "c" proposto por Camargo e Sentelhas (1997).

Valor de "c"	Desempenho
> 0,85	Ótimo
0,76 - 0,85	Muito Bom
0,66 - 0,75	Bom
0,61 - 0,65	Mediano
0,51 - 0,60	Sofrível
0,41 - 0,50	Mau
≤ 0,40	Péssimo

Para a quantificação dos erros proporcionados pelas estimativas, foram analisados os seguintes parâmetros estatísticos: EM, erro médio (mm.dia⁻¹); RMSE, raiz quadrada do erro quadrático médio (mm.dia⁻¹); CRM, coeficiente de massa residual; EPE, erro padrão da estimativa. Os melhores resultados são aqueles que apresentam os parâmetros acima mais próximos a zero.

a) Erro médio (EM):

$$EM = \frac{\sum_{i=1}^N (P_i - O_i)}{N} \quad (34)$$

b) Erro padrão da estimativa normalizado (RMSE):

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2 \right]^{0,5} \cdot \left(\frac{100}{\bar{O}} \right) \quad (35)$$

c) Coeficiente de massa residual (CRM):

$$CRM = \frac{\sum_{i=1}^n O_i - \sum_{i=1}^n P_i}{\sum_{i=1}^n O_i} \quad (36)$$

d) Erro padrão da estimativa (EPE):

$$EPE = \sqrt{\left(\frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)}{N - 1} \right)^2} \quad (37)$$

Nas Equações 34, 35, 36 e 37 P_i são os valores simulados (ou os valores a serem comparados); O_i são os valores de referência ou padrão (os de maior precisão e confiabilidade); N e o número de dados e \bar{O} a média dos valores de referência.

A média dos métodos foi testada com a do método de referência a 5% de probabilidade, pelo teste de Student, para avaliar se os métodos apresentam médias estatisticamente iguais. Toda a análise estatística foi realizada na ferramenta “análise de dados” do Excel.

Para analisar e discutir a influência de cada variável climática na estimativa da evaporação no presente trabalho foi utilizada a metodologia apresentada por Silva *et al.* (2009),

Lelis *et al.* (2012) e Vieira (2015) no qual será realizada uma análise de sensibilidade de cada variável de entrada do modelo individualmente, como: temperatura, velocidade do vento, umidade relativa, pressão atmosférica e insolação através do índice de sensibilidade (IS). O índice de sensibilidade (IS) é dado pela Equação 38, para cada variável com a finalidade de quantificar a sensibilidade de cada parâmetro. De acordo com Evangelista (2003), quanto maior são os valores de IS, em módulo, maior é a sensibilidade do modelo às mudanças de valores de um parâmetro, e quando mais próximos de zero indicam que o modelo não apresenta sensibilidade ao parâmetro.

$$IS = \left| \frac{\frac{E_{-50\%} - E_{+50\%}}{E_0}}{\frac{\sigma_{-50\%} - \sigma_{+50\%}}{\sigma_0}} \right| \quad (38)$$

Na Equação 38, IS é o índice de sensibilidade do método as variáveis climáticas de entrada, adimensional; $E_{-50\%}$ é a estimativa de evaporação, função da variável independente σ reduzida em 50% ($\sigma_{-50\%}$); $E_{+50\%}$ é a estimativa de evaporação, função da variável independente σ aumentada em 50% ($\sigma_{+50\%}$); e E_0 é estimativa de evaporação, função da variável independente σ para seu valor de referência (σ_0).

Também foi calculada a evaporação variando individualmente cada variável de entrada do modelo, como: temperatura, velocidade do vento, umidade relativa, pressão atmosférica e insolação, ao passo que os outros são mantidos constantes, sendo os valores de entrada alterados em 10, 20, 30, 40 e 50%, tanto para positivo quanto para negativo, com o intuito de analisar a variação da evaporação em relação à variação das variáveis de entrada.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

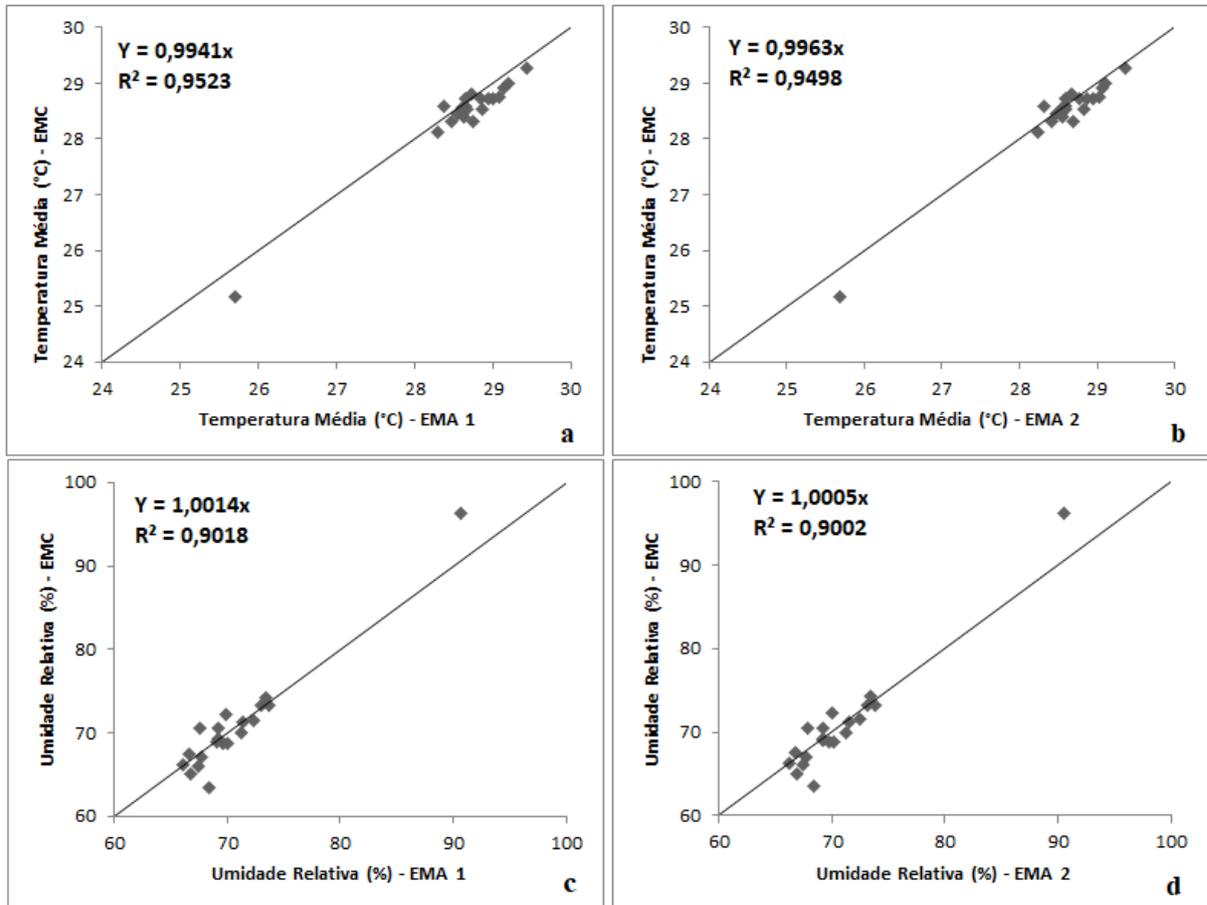
5.1 Validação das estações meteorológicas

As regressões lineares simples e os respectivos coeficientes de determinação (R^2) entre os dados obtidos pela EMC e a EMA 1 e a EMA 2 para as variáveis: temperatura média e umidade relativa (Figura 12) mostraram elevada correlação (R^2 acima de 90%) entre os valores obtidos pelas duas estações meteorológicas. Quanto à temperatura média do ar (Figuras 12a-b), observa-se pequena dispersão dos dados, com R^2 de 0,952 e 0,950 para EMA 1 e EMA 2, respectivamente, indicando boa precisão e também excelente exatidão com nulidade do coeficiente linear ($a=0$) e coeficiente angular muito próximo de 1, apesar de as temperaturas

médias diárias terem sido avaliadas de maneiras distintas, como mostra a Tabela 3. Também há diferenças no sistema de medida da temperatura do ar, que no caso da EMC apresenta o mercúrio como elemento sensor, enquanto nas EMAs é o termistor. A diferença entre a temperatura média em ambas as estações automáticas e a estação convencional foi bastante pequena, com média absoluta de 0,2 e 0,1 °C para EMA 1 e EMA 2, respectivamente. Essas diferenças foram inferiores às encontradas por Almeida *et al.* (2008) e Oliveira *et al.* (2010). Os referidos estudos compararam dados meteorológicos em estação meteorológica convencional (EMC) e em estação meteorológica automática (EMA), em Areia – PB e Jaboticabal – SP, respectivamente. Os autores observaram uma diferença média entre as medidas de temperatura média da EMC e EMA de 0,66 e 0,4°C, respectivamente.

Os resultados demonstram elevada correlação no que se refere à umidade relativa do ar (Figura 12c-d, $R^2 = 0,90$) em ambos os casos, isto é, entre EMC e as duas estações automáticas (EMA 1 e EMA 2). Outros indicadores da validade dos dados medidos são a nulidade do coeficiente linear ($a=0$) e o valor de coeficiente angular igual a 1, em ambas as estações automáticas. A diferença média absoluta entre as estações foi de 0,01% e 0,1% para EMA 1 e EMA 2, respectivamente, melhor que os resultados encontrados por Oliveira *et al.* (2010) e por Pereira *et al.* (2008) em Jaboticabal – SP e Londrina – PR, respectivamente. Os autores identificaram diferença média absoluta de 5,7% e 9,2% para umidade relativa, ao comparar esta mesma variável medida em estação meteorológica convencional (EMC) e em estação meteorológica automática (EMA).

Figura 12 – Validação das estações meteorológicas através da comparação de dados diários para o período de 11 a 30 de novembro de 2018, no Campus do Pici, Fortaleza, CE. (a) temperatura média do ar observados em EMA 1 e EMC; (b) temperatura média do ar observados em EMA 2 e EMC; (c) umidade relativa média do ar observados em EMA 1 e EMC; e (d) umidade relativa do ar observados em EMA 2 e EMC.

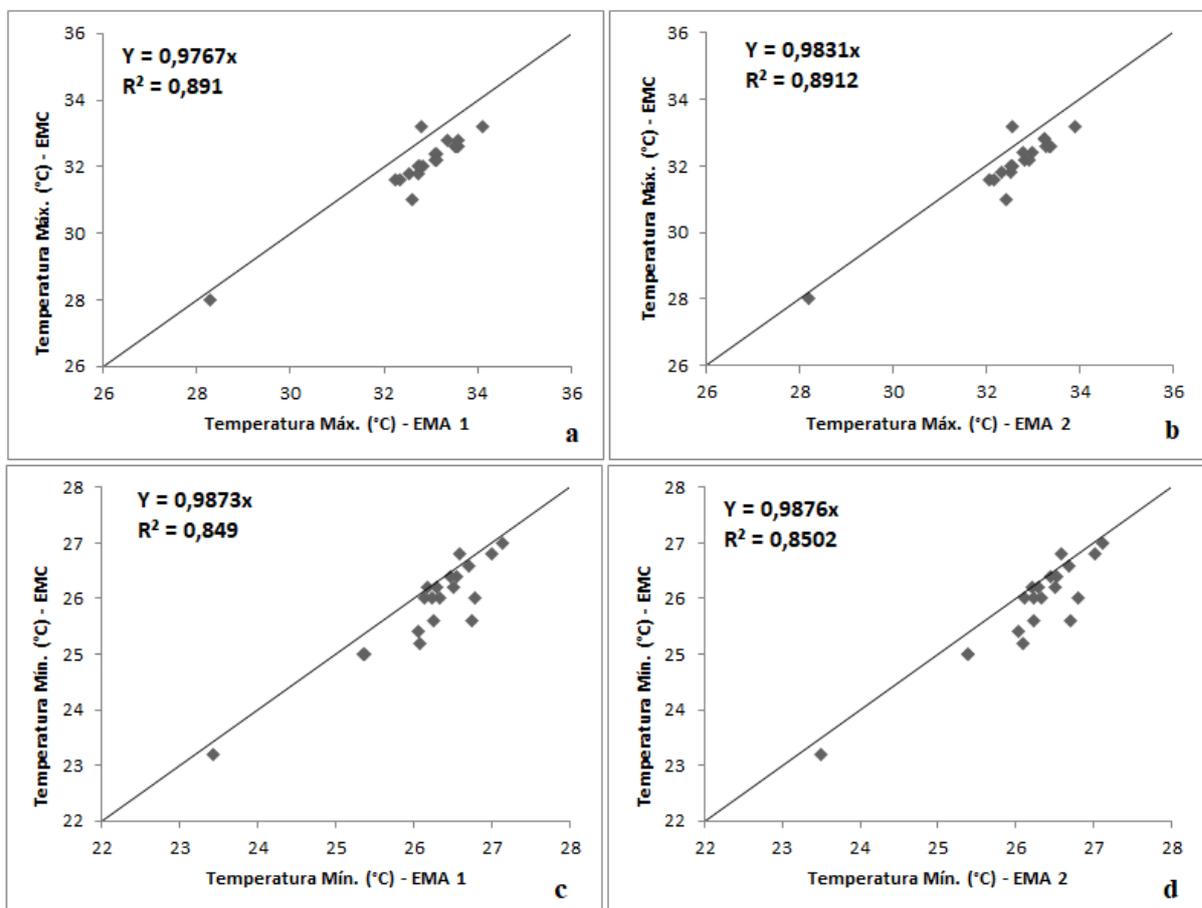


Para a variável temperatura máxima diária (Figura 13a-b), verificou-se boa correlação em ambas as estações automáticas em relação às medidas na estação convencional: coeficiente linear zero ($a = 0$) e coeficiente angular próximo a 1 ($b = 0,977$ e $0,983$ para EMA 1 e EMA 2, respectivamente). O coeficiente de correlação foi também bastante elevado ($R^2 = 0,891$ em ambas estações). A diferença média absoluta foi de $0,8$ e $0,5^\circ\text{C}$, respectivamente. Esses valores são da mesma ordem de grandeza, embora superiores, aos encontrados por Pereira *et al.* (2008: $0,2^\circ\text{C}$), ao compararem a temperatura máxima diária obtida em uma estação meteorológica automática (EMA) e em uma estação meteorológica convencional (EMC) em Jaboticabal – SP.

Em relação à comparação da temperatura mínima registrada a partir de EMA 1 e de EMA 2 em comparação com EMC (Figura 13c-d), percebe-se a validade em ambas. O coeficiente linear é zero ($a = 0$), o coeficiente angular é próximo a 1 ($b = 0,987$ e $0,988$ para

EMA 1 e EMA 2, respectivamente) e verifica-se boa correlação ($R^2 = 0,849$ e $0,850$ para EMA 1 e EMA 2, respectivamente). A diferença média absoluta foi de $0,3^\circ\text{C}$ para ambas as estações automáticas, com tendência de valores maiores para as EMAs. Esse resultado é ligeiramente inferior aos de Pereira *et al.*, (2008) e de Oliveira *et al.*, (2010). Os referidos autores compararam a temperatura mínima obtida em estação meteorológica convencional (EMC) e em estação meteorológica automática (EMA), em Londrina – PR e Jaboticabal – SP, respectivamente. Eles obtiveram coeficientes de determinação, respectivamente, de $0,995$ e $0,963$.

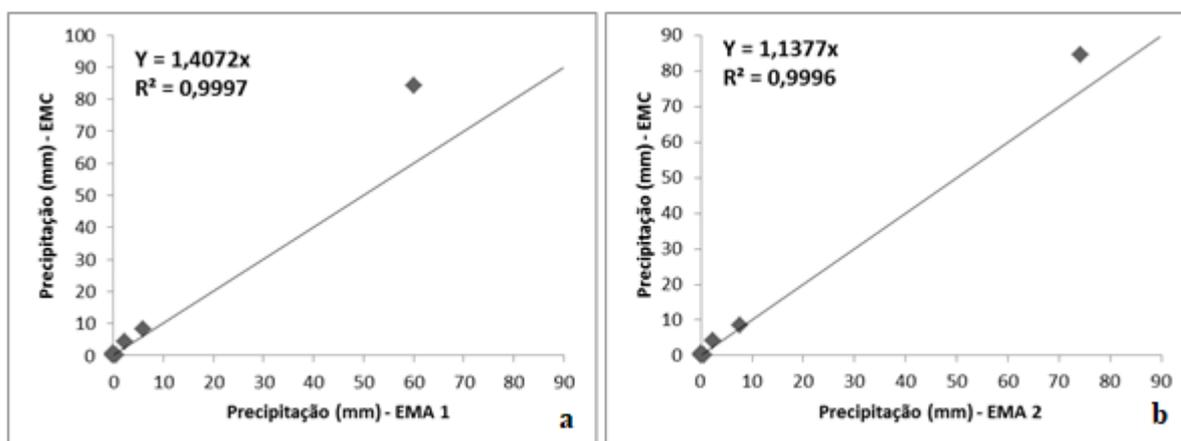
Figura 13 – Validação das estações meteorológicas através da comparação de dados diários para o período de 11 a 30 de novembro de 2018, no Campus do Pici, Fortaleza, CE. (a) temperatura máxima do ar observada em EMA 1 e EMC; (b) temperatura máxima do ar observada em EMA 2 e EMC; (c) temperatura mínima do ar observada em EMA 1 e EMC; e (d) temperatura mínima do ar observada em EMA 2 e EMC.



Com relação à precipitação pluviométrica (Figura 14), verificou-se boa precisão ($R^2 = 0,9997$ e $0,9996$ para EMA 1 e EMA 2, respectivamente) e exatidão ($a = 0$ em ambas estações e $b = 1,4072$ e $1,1377$ para EMA 1 e EMA 2, respectivamente). A diferença média absoluta é da ordem de $1,3$ mm na EMA 1 e $0,6$ mm na EMA 2. Houve uma tendência de os

dados obtidos pela EMC serem maiores que os valores das EMAs. Oliveira *et al.* (2010) e Pereira *et al.* (2008) também encontraram essa tendência de valores menores na EMA em relação a EMC. Sentelhas & Caramori (2002) ao analisar as inconsistências e quantificar os erros associados ao uso operacional de pluviômetros de báscula em estações meteorológicas automáticas, avaliando a relação entre as chuvas diárias medidas por pluviômetros convencionais e de báscula, em Londrina – PR e em Piracicaba – SP, observaram a tendência de sub-medidas nos sensores eletrônicos atribuindo isto ao sistema de báscula do pluvimetro, acreditando que há uma incapacidade do sensor de registrar todo o volume coletado na mesma velocidade com que ela ocorre em eventos de precipitação intensa.

Figura 14 – Validação das estações meteorológicas através da comparação de dados diários para o período de 11 a 30 de novembro de 2018, no Campus do Pici, Fortaleza, CE. (a) precipitação pluviométrica observada na EMA 1 e EMC; (b) precipitação pluviométrica observada na EMA 2 e EMC.

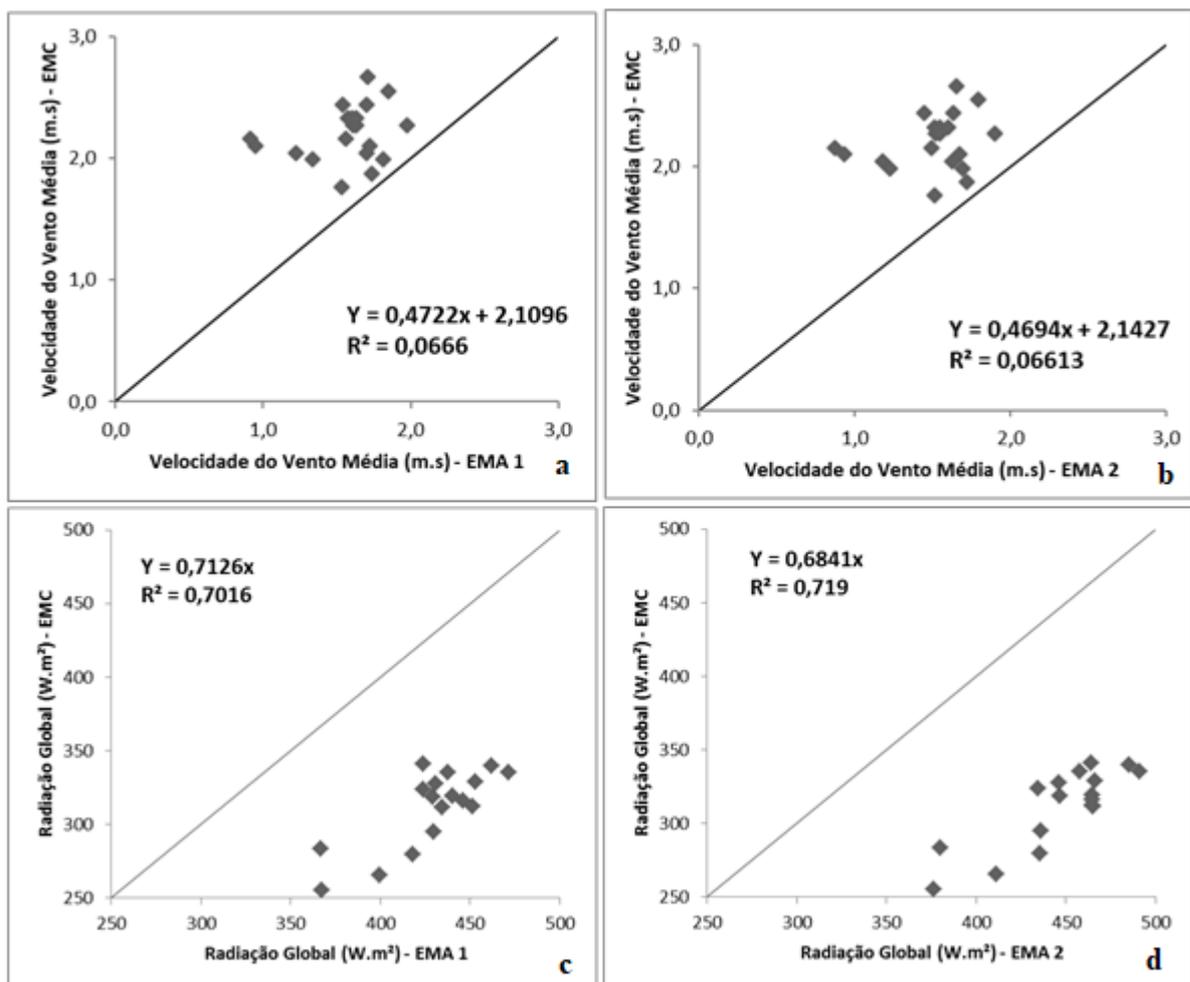


Com relação  velocidade média do vento a 2 m de altura (Figura 15a-b), a análise de regressão mostra que houve maior dispersão dos dados, ambas apresentaram coeficiente de determinação baixo ($R^2 = 0,0666$ e $0,0613$). Em relação  exatidão entre as estações, estas apresentaram $a = 2,11$ e $2,14$, respectivamente para EMA 1 e EMA 2, e $b = 0,47$ e $0,47$ para EMA 1 e EMA 2, respectivamente. A diferena média absoluta foi da ordem de $1,3 \text{ m.s}^{-1}$, valor superior ao encontrado por Oliveira *et al.*, (2010) que foi da ordem de $0,37 \text{ m.s}^{-1}$. A dispersão dos dados ocorreu devido, provavelmente, ao fato de a velocidade do vento a 2 m de altura na EMC ter sido estimada, a partir da velocidade obtida a 10 metros de altura, podendo ser fonte considerável de erros, e que pode inviabilizar a utilização dessa variável na comparação com as EMAs. Notou-se que, para velocidades mais baixas (até 3 m.s^{-1}) a dispersão dos dados foi menor, e  medida que a velocidade aumentou, a dispersão tornou-se maior, corroborando com

os estudos de Oliveira *et al.* (2010). Os valores da velocidade medida a 10 m e os valores estimados a 2 m para todo o período são apresentados no Apêndice A.

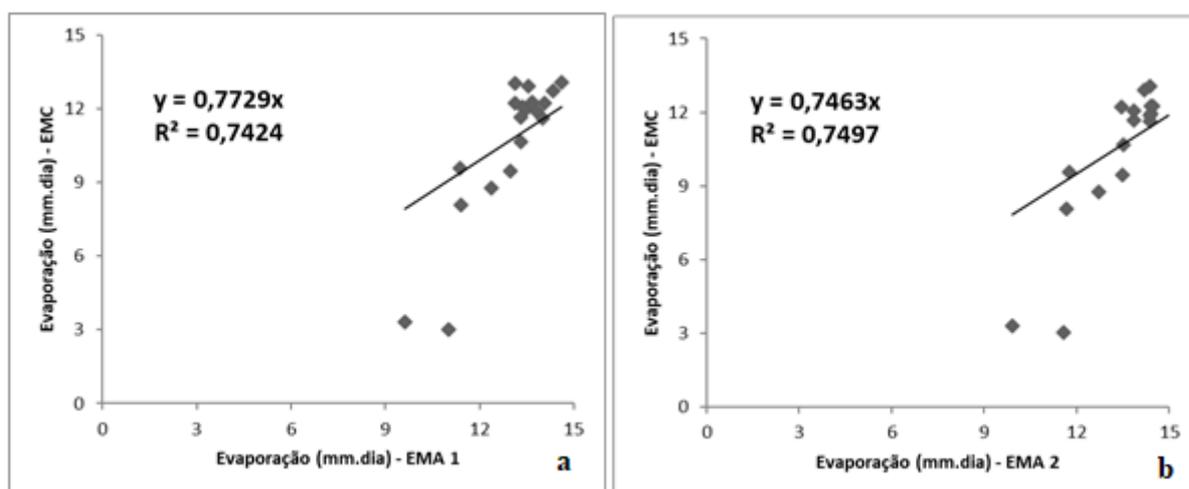
Em relação à radiação solar global (Figura 15c-d), houve maior dispersão dos dados, apresentando uma razoável correlação ($R^2 = 0,702$ e $0,719$) entre as estações ($a=0$ em ambas as estações e $b=0,7126$ e $0,6841$ para EMA 1 e EMA 2, respectivamente). A diferença média absoluta foi de 122 W.m^{-2} e 139 W.m^{-2} para EMA 1 e EMA 2, respectivamente. A dispersão dos dados pode ter ocorrido provavelmente por a radiação solar global na EMC ter sido estimada a partir da insolação diária, segundo o método apresentado por Angstrom (1924) e Aguiar *et al.* (1999), podendo ser fonte considerável de erros.

Figura 15 – Validação das estações meteorológicas através da comparação de dados diários para o período de 11 a 30 de novembro de 2018, no Campus do Pici, Fortaleza, CE. (a) velocidade do vento a 2 m de altura registrada na EMA 1 e estimada para a EMC; (b) velocidade do vento a 2 m de altura registrada na EMA 2 e estimada para a EMC; (c) radiação solar global registrada na EMA 1 e estimada para a EMC; e (d) radiação solar global registrada na EMA 2 e estimada para a EMC.



Em relação à evaporação diária estimada pelo modelo de Penman (Figura 16a-b), a análise de regressão apresentou uma razoável correlação ($R^2 = 0,742$ e $0,749$) e exatidão entre as estações ($a=0$ em ambas as estações e $b=0,77$ e $0,75$ para EMA 1 e EMA 2, respectivamente). O erro médio absoluto foi de $2,4$ mm/dia e $3,0$ mm/dia para EMA 1 e EMA 2, respectivamente.

Figura 16 – Validação das estações meteorológicas através da comparação de dados diários da evaporação diária estimada por Penman, para o período de 11 a 30 de novembro de 2018, no Campus do Pici, Fortaleza, CE. (a) evaporação diária estimada pelos dados climatológicos da EMA 1 e estimada pela a EMC; (b) evaporação diária estimada pelos dados climatológicos da EMA 2 e estimada pela a EMC.



Na Tabela 5 observam-se os índices estatísticos para análise de concordância de cada variável. O índice de concordância (d) foi próximo a 1 para os elementos, exceto para radiação solar global, velocidade do vento e evaporação diária.

Tabela 5 – Índices estatísticos para análise da concordância entre as variáveis: temperatura média (T_{med}), temperatura máxima (T_{max}), temperatura mínima (T_{min}), umidade relativa do ar (UR), velocidade do vento a 2 m ($V. Vento$), precipitação ($Prec.$) e radiação solar global (Q_g), obtidos nas estações EMA 1, EMA 2 e EMC, no Campus do Pici, Fortaleza, CE, de 11 a 30 de novembro de 2018.

Variável	b		R ²		d		RMSE	
	EMC-EMA1	EMC-EMA2	EMC-EMA1	EMC-EMA2	EMC-EMA1	EMC-EMA2	EMC-EMA1	EMC-EMA2
T_{med} (°C)	0,994	0,996	0,952	0,950	0,975	0,981	0,852	0,731
$T_{máx}$ (°C)	0,977	0,983	0,891	0,891	0,873	0,915	2,630	2,041
$T_{mín}$ (°C)	0,987	0,988	0,849	0,850	0,920	0,921	1,797	1,769
UR (%)	1,001	1,001	0,902	0,900	0,969	0,968	2,884	2,905
V. vento a 2 m ($m.s^{-1}$)	1,782	1,854	0,066	0,061	0,361	0,351	48,271	50,276
Prec (mm)	1,407	1,138	0,9997	0,9996	0,994	0,995	57,396	49,942
Q_g ($W.m^{-2}$)	0,713	0,684	0,702	0,719	0,412	0,383	41,638	47,398
Evaporação (mm/dia)	0,773	0,746	0,742	0,749	0,624	0,601	29,004	32,734

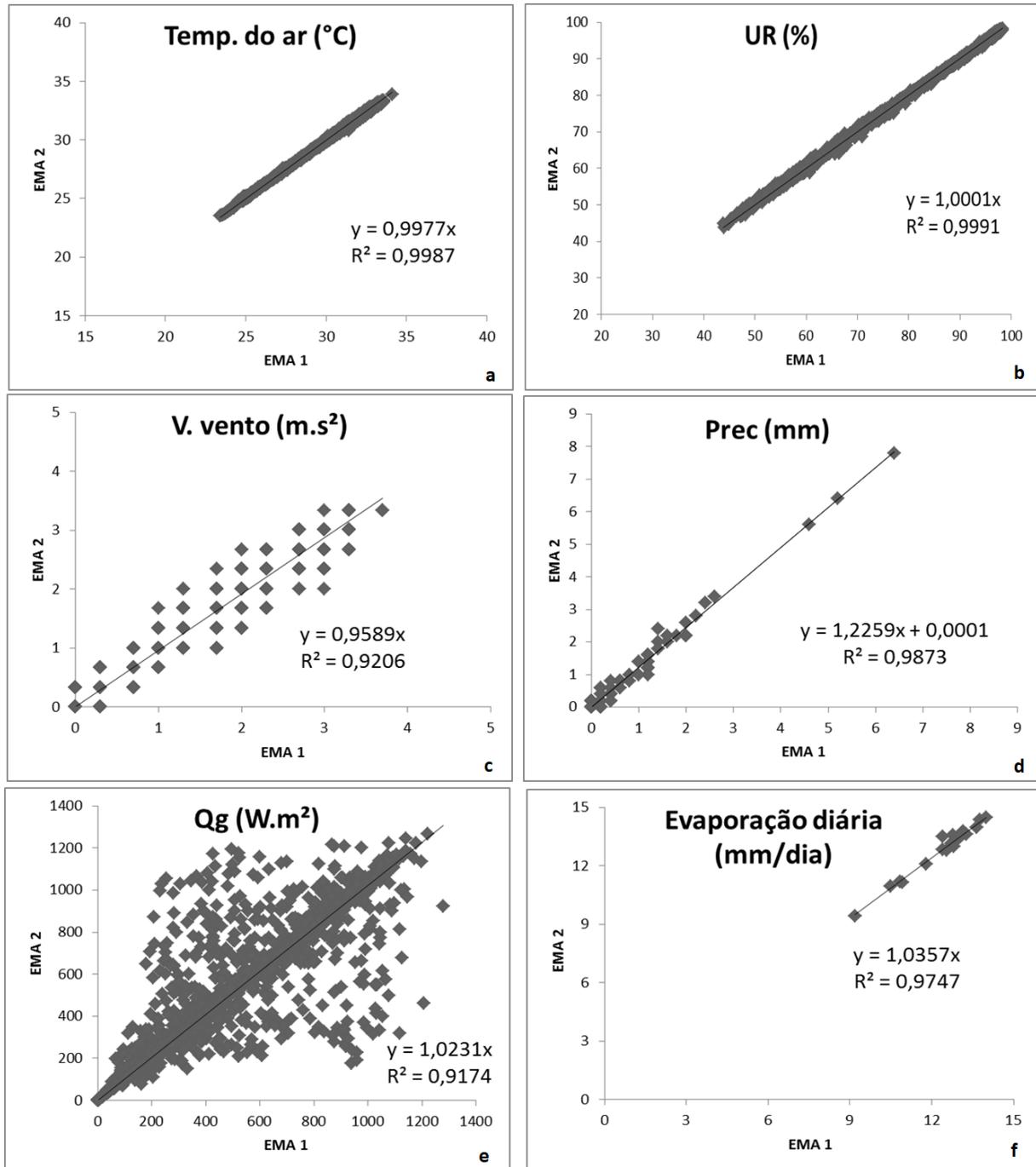
b = coeficiente angular da reta de ajuste, R^2 = coeficiente de determinação, d = índice de concordância, RMSE = erro padrão da estimativa normalizada.

Para a precipitação, verifica-se boa concordância entre as medidas da EMC e das estações automáticas, com coeficiente d igual a 0,994 e 0,995 para EMA 1 e EMA 2, respectivamente. Em relação ao RMSE, este foi o mais elevado entre as variáveis meteorológicas analisadas com valores de 57,4 e 49,9 para EMA 1 e EMA 2, respectivamente. A radiação solar global, a velocidade do vento e a evaporação diária estimada apresentaram as menores concordâncias entre as estações, com índice d próximo a 0,4 e elevados valores de RMSE. Desta forma, nota-se uma boa concordância entre as estações, principalmente para as temperaturas média, mínima e máxima, precipitação e a umidade relativa do ar. A radiação solar global e a velocidade do vento são as variáveis que mostram a pior correlação, além dos maiores erros médios, entre as estações meteorológicas.

Essas diferenças entre as variáveis meteorológicas medidas pela estação convencional e automática repercutem no cálculo da evaporação, embora, o método de cálculo seja o mesmo, os valores da evaporação serão diferentes, principalmente quando essas diferenças forem entre as variáveis que o método apresentar maior sensibilidade. Dessa forma, essas diferenças da evaporação têm grande relevância, já que se buscam estimativas precisas e confiáveis.

Ao comparar os dados obtidos das estações meteorológicas automáticas entre si para a verificação se ambas medem igualmente notou-se que ambas possuem uma boa correlação, com R^2 acima de 0,90 para todas as variáveis meteorológicas avaliadas, conforme mostra a Figura 17. Observa-se que as maiores correlações se dão entre as estações, principalmente, para a temperatura do ar, precipitação, a umidade relativa do ar e a evaporação diária estimada com R^2 maior que 0,95. O coeficiente angular em todas as variáveis é bem próximo a 1, o que indica boa correlação entre as estações e o coeficiente linear é nulo, exceto para precipitação, embora seja bem próximo a zero.

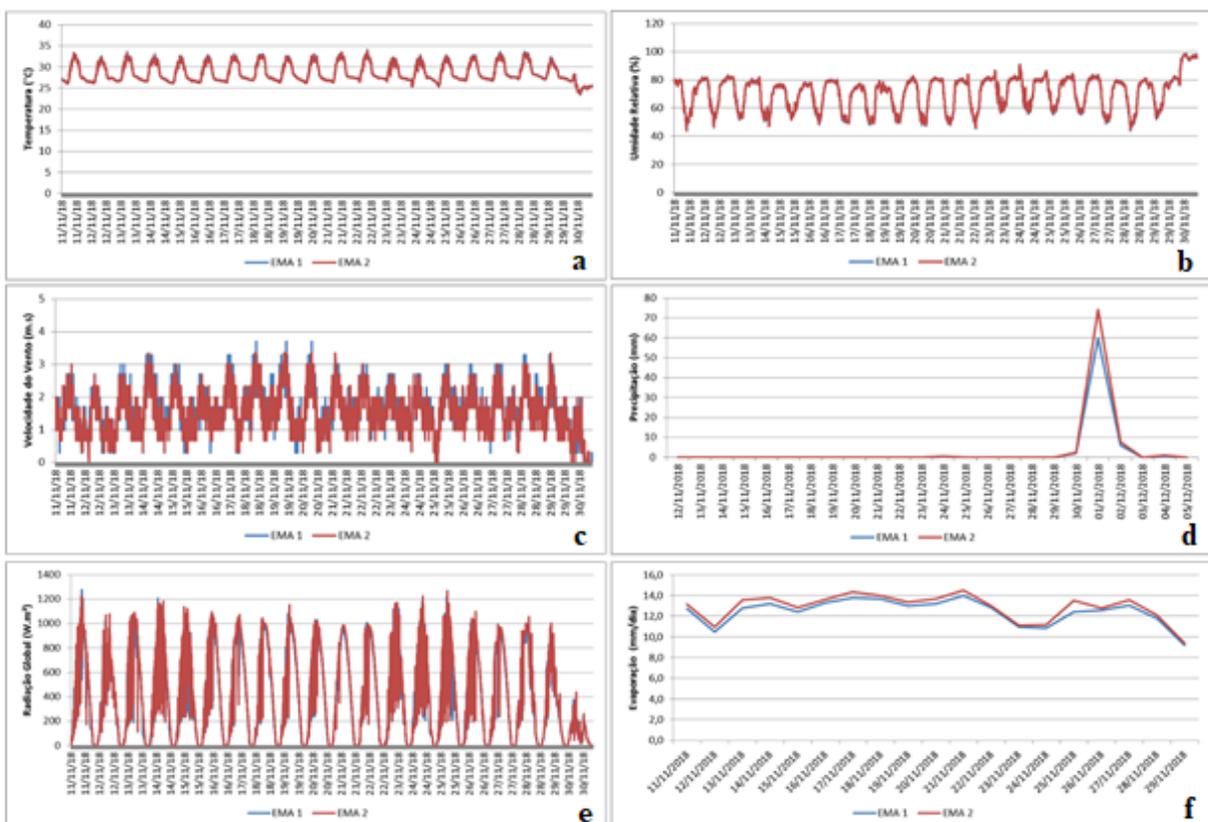
Figura 17 – Validação das estações meteorológicas através da comparação de dados diários da evaporação diária estimada por Penman, para o período de 11 a 30 de novembro de 2018, no Campus do Pici, Fortaleza, CE. (a) temperatura do ar observada na EMA 1 e EMA 2; (b) umidade relativa do ar observada na EMA 1 e EMA 2; (c) velocidade do vento a 2 m observada em EMA 1 e EMA 2; (d) precipitação observada na EMA 1 e EMA 2; (e) radiação solar global (Qg) observada em EMA 1 e EMA 2; e (f) evaporação diária estimada através dos dados climáticos da EMA 1 e EMA 2.



A Figura 18 revela que as diferenças entre temperatura, umidade relativa, velocidade do vento, precipitação, radiação solar e evaporação foram pequenas, sendo que a

maior diferença entre as estações meteorológicas ocorreu quando se compararam os valores de radiação solar global, apresentando uma diferença média entre as estações de 17 W.m^2 . Para a variável temperatura do ar, a diferença média entre as estações foi de $0,07 \text{ }^\circ\text{C}$. Para a umidade relativa do ar, a diferença entre as estações foi de $0,22\%$, enquanto que para a velocidade do vento a 2 m , a diferença foi de $0,13 \text{ m.s}^{-1}$. Para precipitação, a diferença foi de $0,003 \text{ mm}$ e para a evaporação diária foi de $0,44 \text{ mm/dia}$.

Figura 18 – Validação das estações meteorológicas através da comparação de dados diários da evaporação diária estimada por Penman, para o período de 11 a 30 de novembro de 2018, no Campus do Pici, Fortaleza, CE. (a) temperatura do ar observada em EMA 1 e EMA 2; (b) umidade relativa do ar observada em EMA 1 e EMA 2; (c) velocidade do vento a 2 m observada em EMA 1 e EMA 2; (d) precipitação observada em EMA 1 e EMA 2; (e) radiação solar global observada em EMA 1 e EMA 2; e (f) evaporação diária estimada por EMA 1 e EMA.



Na Tabela 6 observam-se os índices estatísticos para análise de concordância entre as estações automáticas para cada variável meteorológica. Os valores do teste de t-Student para um intervalo de confiança de 95% para todas as variáveis mostraram que as diferenças das médias da população não são estatisticamente significativas, com o valor de p maior que o nível de significância de 0,05.

Tabela 6 – Índices estatísticos para análise da concordância entre as variáveis meteorológicas obtidos nas EMA 1 e EMA 2.

VARIÁVEL	a	b	R ²	p-value
Temperatura do ar	0	0,9977	0,9987	0,793
Umidade Relativa	0	1,0001	0,9991	0,969
Velocidade do Vento	0	0,9589	0,9206	0,478
Precipitação	0,0001	1,2259	0,9873	0,867
Radiação Global	0	1,0231	0,9174	0,464
Evaporação diária	0	1,0357	0,9747	0,253

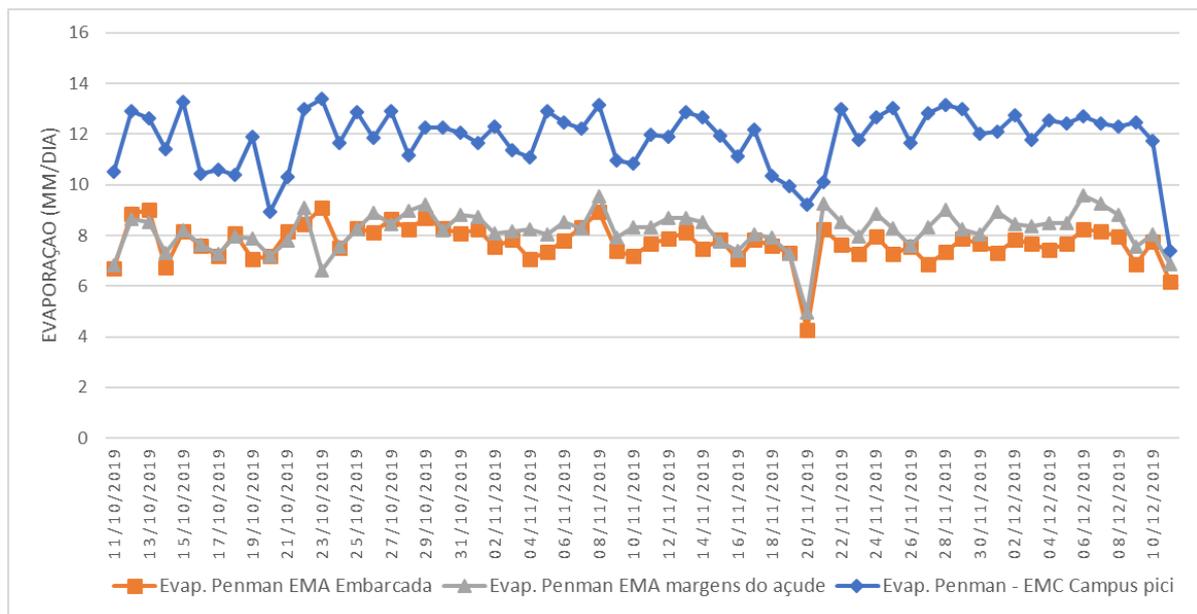
a = coeficiente linear da reta de ajuste, b = coeficiente angular da reta de ajuste, R² = coeficiente de determinação; p-value = probabilidade que mede a evidência contra a hipótese nula.

5.2 Evaporação no reservatório Gavião

5.2.1 Estimativa da evaporação pelo método de Penman

Na Figura 19 estão apresentadas as estimativas da evaporação no reservatório Gavião por meio do modelo de Penman no período de 11 de outubro de 2019 a 11 de dezembro de 2019.

Figura 19 – Evaporação diária (mm) no reservatório Gavião estimada pelo método de Penman (1948) com base em dados de três estações meteorológicas.



Na Tabela 7 são apresentados os resultados de evaporação estimada pelo modelo de Penman através das diferentes estações meteorológicas. A taxa de evaporação média diária para o reservatório Gavião foi de 7,7 mm, 8,2 mm e 11,8 mm estimadas a partir das estações

embarcada, próxima ao lago e distante do lago, respectivamente. A taxa de evaporação encontrada foi superior aos valores encontrados por outros estudos que também estimaram a evaporação em reservatórios pelo método de Penman. Barbosa e Mattos (2007), entre fevereiro de 2006 e fevereiro de 2007, estimaram a evaporação em 4,77 mm/dia num pequeno reservatório localizado na bacia experimental de Serra Grande do Norte - RN. Oliveira e Medeiros (2003) também estimaram a evaporação em 3,99 mm/dia, em três reservatórios semiáridos na bacia hidrográfica do rio Paraguaçu (BA), usando o método de Penman. Dantas (2017) estimou a evaporação no reservatório Castanhão (CE) utilizando dados obtidos em uma estação meteorológica instalada sobre o espelho d'água e uma estação em terra, encontrando valores em média de evaporação na água de 3,99 mm/dia e na terra de 3,29 mm/dia. Entretanto, os valores medidos nesta pesquisa (8 – 12 mm/dia) são compatíveis com valores estimados com base em balanço hídrico na região (MOLLE, 1989; ARAGÃO ARAÚJO, 1992; MOLLE & CADIER, 1992; DE ARAÚJO *et al.*, 2006; CAMPOS, 2010).

Ao comparar os valores médios diários obtidos no presente trabalho para o reservatório Gavião estimados pelo método de Penman com os valores médios diários apresentados nas Normais Climatológicas do INMET (período de 1981 a 2010), medidos com evaporímetro Piché, para estação de Fortaleza observou-se que para todos os meses analisados no presente estudo, outubro a dezembro, a taxa de evaporação encontrada para o reservatório foi superior aos valores das Normais Climatológicas do INMET (período de 1981 a 2010). A taxa de evaporação média diária segundo as Normais Climatológicas do INMET é de 6,7 mm para o mês de outubro, de 6,7 mm para o mês de novembro e de 6,0 mm para o mês de dezembro. Enquanto que a taxa de evaporação média diária para o reservatório Gavião para o mês de outubro foi de 8,0 mm, 8,1 mm e 11,7 mm estimadas a partir das estações embarcada, próxima ao lago e distante do lago, respectivamente. Para o mês de novembro foi de 7,6 mm, 8,2 mm e 11,9 mm estimadas a partir das estações embarcada, próxima ao lago e distante do lago, respectivamente. E para o mês de dezembro foi de 7,6 mm, 8,4 mm e 11,9 mm estimadas a partir das estações embarcada, próxima ao lago e distante do lago, respectivamente.

Tabela 7 – Evaporação diária média, desvio padrão, máxima e mínima no reservatório Gavião estimada pelo método de Penman no período de 11 de outubro a 11 de dezembro de 2019.

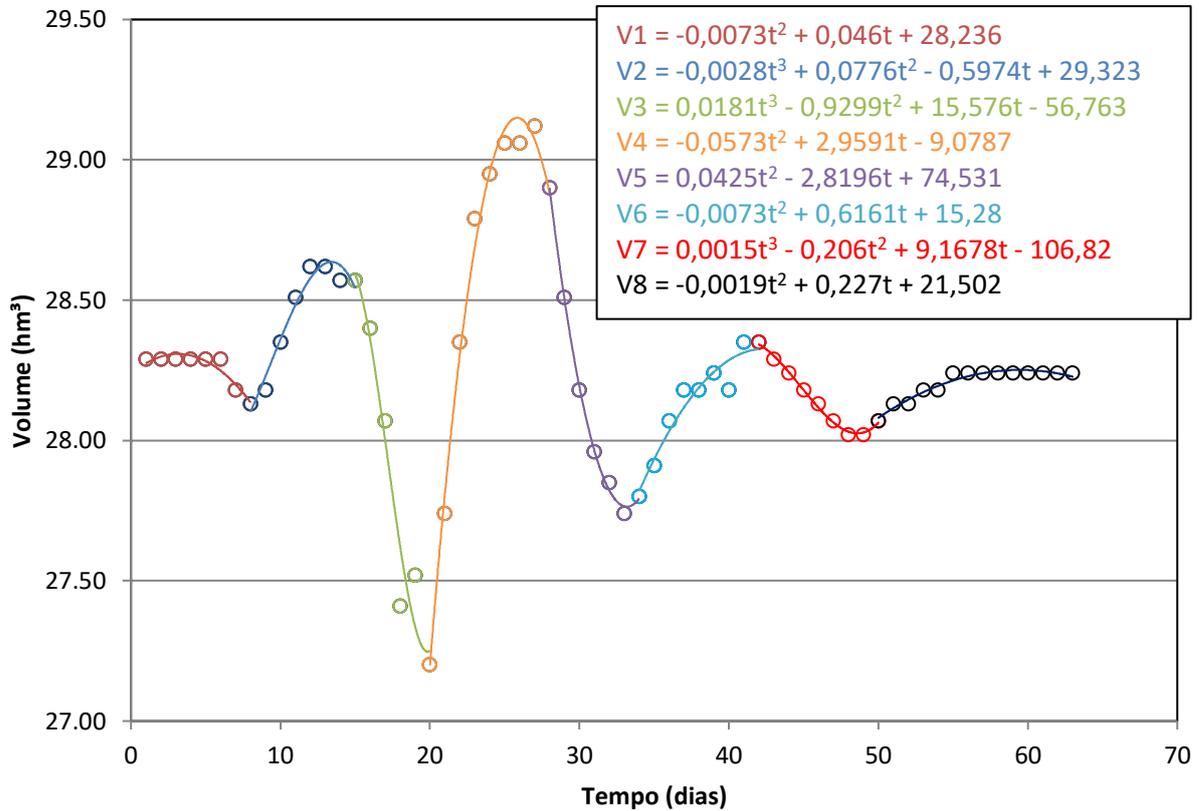
Estação meteorológica	Evaporação (mm/dia)			
	Média	Desvio Padrão	Máxima	Mínima
Estação automática embarcada	7,7	0,7	9,1	4,3
Estação automática nas margens do açude	8,2	0,8	9,6	5,0
Estação convencional do Campus do Pici	11,8	1,2	13,4	7,4

5.2.2 Estimativa da evaporação pelo método do balanço hídrico

O método do balanço hídrico, apesar de sua simplicidade conceitual, não é de tão fácil aplicação devido à dificuldade de conhecer e quantificar corretamente alguns dos termos, especialmente os relacionados com a interação entre as águas de superfície e as águas subterrâneas (VAREJÃO-SILVA, 2001). No presente estudo essas incertezas foram observadas, não só em relação à infiltração, mas também na vazão afluente ao reservatório Gavião.

As incertezas no cálculo da evaporação a partir do método do balanço hídrico também estão relacionadas com a estimativa do volume armazenado, que depende da precisão da curva cota-área-volume, ou seja, da precisão do levantamento topográfico da área alagada. Os dados de volume disponibilizados pela COGERH têm uma precisão de $0,01 \text{ hm}^3$, o que leva a uma variação muitas vezes abrupta ao se fazer o cálculo de variação do volume no tempo. Para isso, foi necessário realizar uma suavização da curva da variação do volume do reservatório no tempo, conforme demonstra a Figura 20.

Figura 20 – Ajuste de curvas polinomiais para estimativa da variação do volume no tempo, para o reservatório Gavião no período de 10 de outubro a 11 de dezembro de 2019. Os índices associados ao símbolo V (volume) representam as fases de oscilação do estoque de água no reservatório.



O método do balanço hídrico, com base em dados diários, apresenta elevada instabilidade. Por isso, no presente estudo, a evaporação foi calculada para diversos passos temporais (médias móveis): 1 dia, 2 dias, 3 dias e 7 dias, no período de 11 de outubro a 11 de dezembro de 2019. Foram observados valores excessivamente altos e excessivamente baixos de evaporação, sendo estimados valores negativos de evaporação, o que significa que houve ganho e não perda de água no reservatório. O que claramente indica a incerteza de seu cálculo por meio do balanço hídrico para intervalos de tempo menores que um mês, mesmo considerando-se a estação seca, quando a vazão dos rios é zero, essa incerteza tende a ser maior no Gavião que em outros açudes, uma vez que o mesmo faz parte do sistema interligado que abastece a RMF e, portanto, é abastecido por outros reservatórios. Em outros açudes “isolados”, a conclusão pode ser um pouco diferente. Os resultados realçam o grau de incerteza envolvido na estimativa de evaporação em reservatórios quando não há medições diretas e precisas disponíveis. Na Figura 21 são apresentados os valores de evaporação máxima do reservatório Gavião, conforme a Equação 24, estimados pelo método do balanço hídrico para o passo de

tempo de 1 dia, 2 dias, 3 dias e 7 dias. Nota-se que, com o aumento do passo de tempo, a estimativa da evaporação se torna mais estável, com diminuição dos picos. Na Figura 22 são apresentados os valores de evaporação mínima do reservatório Gavião, conforme a Equação 27, estimadas pelo método do balanço hídrico para o passo de tempo de 1 dia, 2 dias, 3 dias e 7 dias.

Figura 21 – Evaporação máxima estimada pelo método do balanço hídrico para médias móveis de 1 dia, 2 dias, 3 dias e 7 dias. O experimento teve início no dia 11 de outubro de 2019.

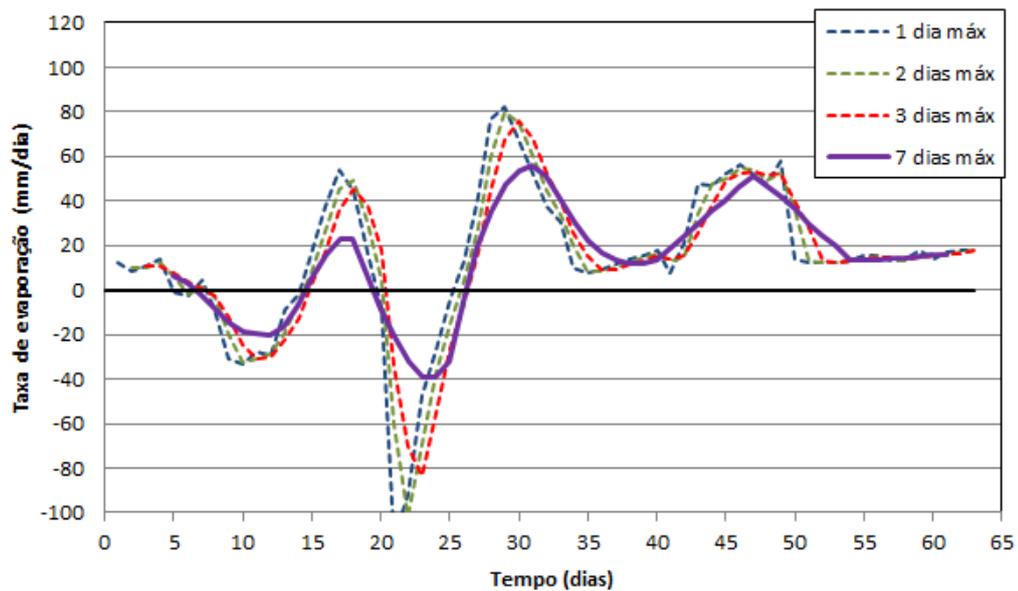
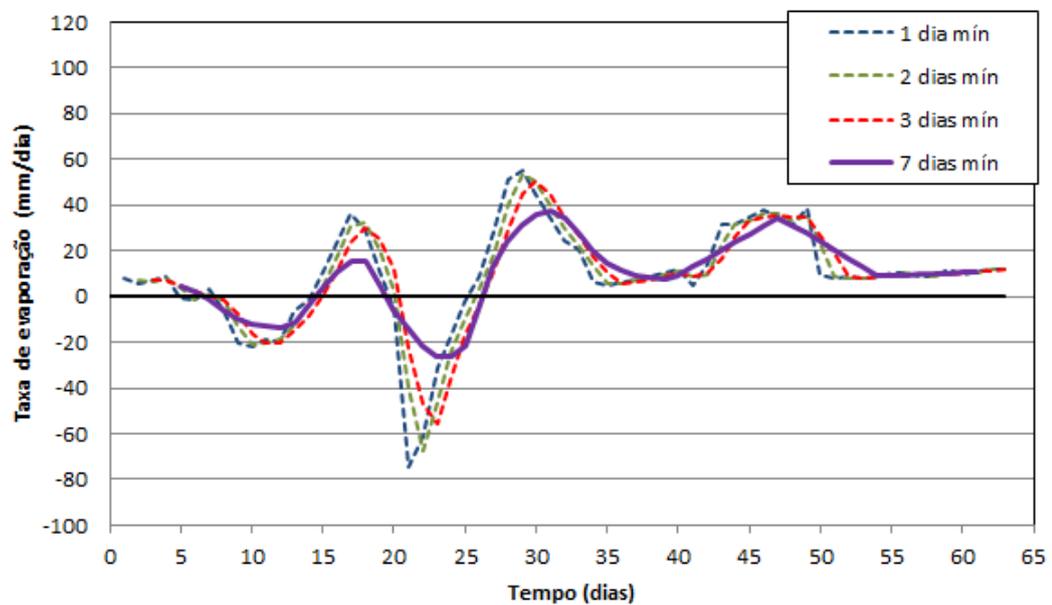


Figura 22 – Evaporação mínima estimada pelo método do balanço hídrico nos passos de tempo de 1 dia, 2 dias, 3 dias e 7 dias. O experimento teve início no dia 11 de outubro de 2019.



Na Tabela 8 são apresentados os valores médios e desvio padrão da evaporação máxima e mínima estimada pelo método do balanço hídrico nos passos de tempo de 1 dia, 2 dias, 3 dias e 7 dias. A taxa de evaporação média diária para o reservatório Gavião oscilou entre 9,2 e 13,7 mm/dia pelo método do balanço hídrico. Note-se que a faixa de valores médios de evaporação para passos de 1 dia (9,2 – 13,7 mm/dia) é semelhante à faixa para passos de 7 dias (9,2 – 13,8 mm/dia). Entretanto, a maior estabilidade para passos temporais mais longos pode ser vista comparando-se o desvio padrão para passo diário (25,3 – 37,9 mm/dia) com aquele para passo semanal (17,1 – 25,7 mm/dia).

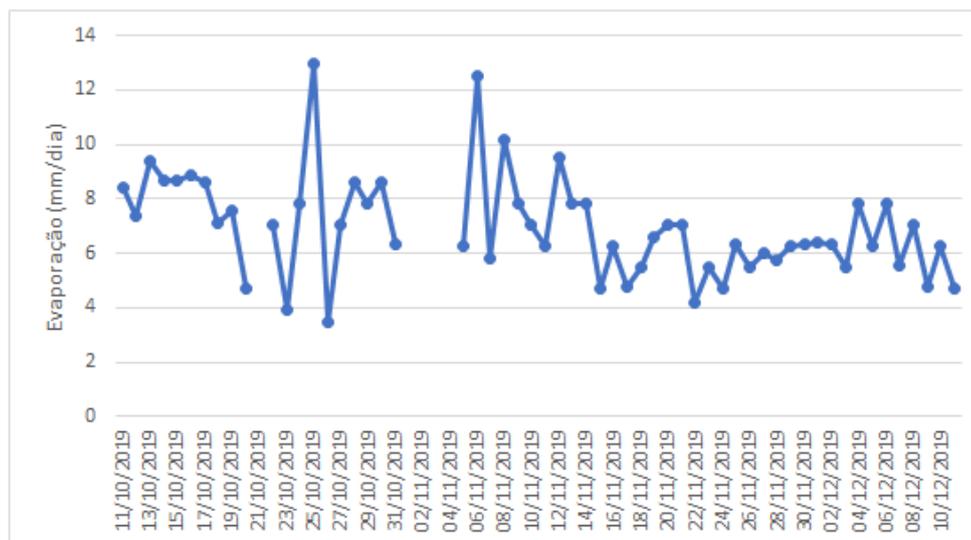
Tabela 8 – Valores médios e desvio padrão da evaporação máxima e mínima estimada pelo método do balanço hídrico no reservatório Gavião nos passos de tempo (média móvel) de 1 dia, 2 dias, 3 dias e 7 dias. Período de 11 de outubro a 11 de dezembro de 2019.

Método do Balanço hídrico	Evaporação Máxima		Evaporação Mínima	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Passo de 1 dia	13,7	37,9	9,2	25,3
Passo de 2 dias	13,7	36,5	9,2	24,4
Passo de 3 dias	13,8	34,9	9,2	23,3
Passo de 7 dias	13,8	25,7	9,2	17,1

5.2.3 Estimativa da evaporação pelo método de Diferença de pressão

Na Figura 23 são apresentados os valores de evaporação no reservatório Gavião medidos de forma direta através do método de diferença de pressão no período de 11 de outubro de 2019 a 11 de dezembro de 2019. Os valores dos dias 21 de outubro e dos dias 01, 02, 03 e 04 de novembro não foram contabilizados, pois houve entrada de água no tanque.

Figura 23 – Evaporação diária (mm) no reservatório Gavião estimada pelo sensor de diferença de pressão



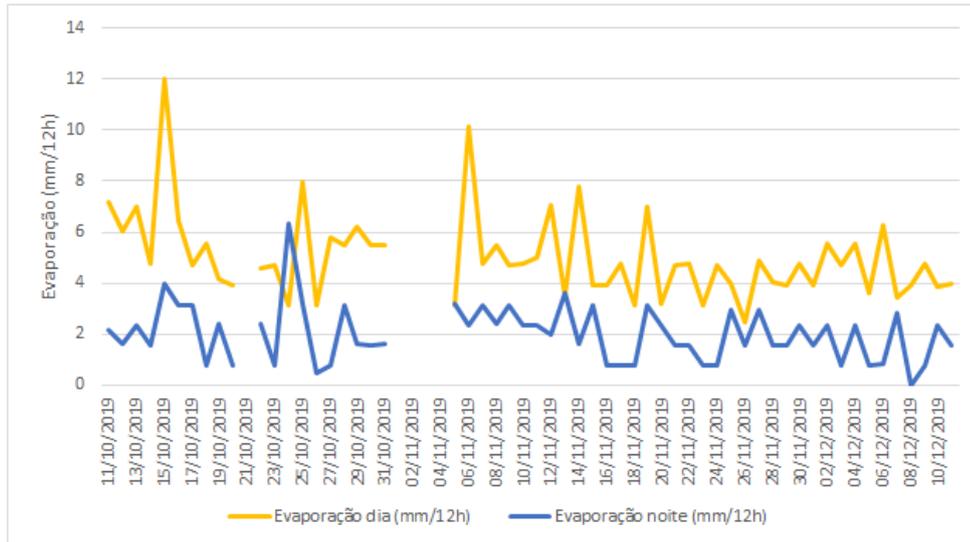
Na Tabela 9 são apresentados a média, desvio padrão e a máxima e mínima evaporação estimada pelo método de diferença de pressão. A taxa de evaporação média diária para o reservatório Gavião foi de 6,9 mm/dia através do método de Diferença de Pressão.

Tabela 9 – Evaporação diária média, desvio padrão, máxima e mínima no reservatório Gavião estimada pelo sensor de diferença de pressão no período de 11 de outubro a 11 de dezembro de 2019.

Modelo de Estimativa de Evaporação	Evaporação (mm)			
	Média	Desvio Padrão	Máxima	Mínima
Método de Diferença de Pressão	6,9	1,9	13,0	3,5

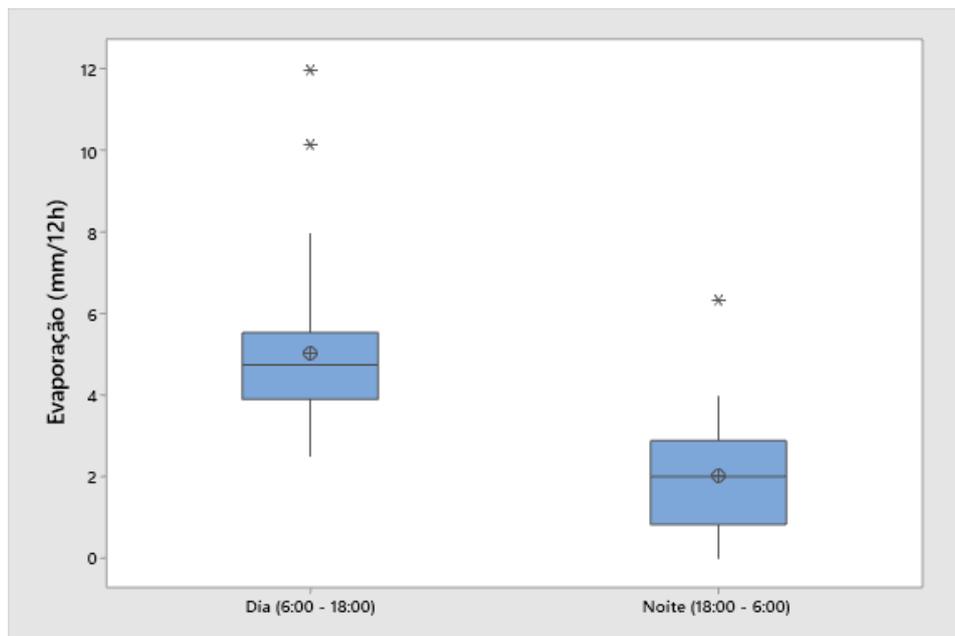
Na Figura 24 são apresentados os valores de evaporação diurna, considerando o período de 6:00 as 18:00, e de evaporação noturna, considerando o período de 18:00 as 6:00 (do dia seguinte). No período noturno, como não há radiação solar para acelerar a energia cinética das moléculas de água, a evaporação é menor e ocorre em função do vento e déficit de pressão de vapor d'água (GOLDBACH & KUTTLER, 2015), fato notado no presente estudo, onde a evaporação noturna é aproximadamente 60% menor que a evaporação diurna.

Figura 24 – Evaporação diurna e noturna (mm/12h) no reservatório Gavião estimada pelo método de Diferença de pressão



No boxplot apresentado na Figura 25 observa-se que a média da evaporação diurna é de 5 mm/12h e mediana de 4,7 mm/12h, já a média da evaporação noturna é de 2 mm/12h e mediana também de 2 mm/12h, tendo a evaporação noturna uma maior dispersão que a evaporação diurna.

Figura 25 – Boxplot da evaporação diurna e noturna no reservatório Gavião estimada pelo método de Diferença de pressão no período de 11 de outubro a 11 de dezembro de 2019.



Na Tabela 10 são apresentadas as taxas de evaporação por hora diurna e noturna. Em média, a taxa de evaporação por hora no período diurno é de 0,42 mm/h e no período

noturno é de 0,17 mm/h. Dessa forma, nota-se que a taxa de evaporação por hora no período diurno é cerca de 0,25 mm/h a mais que a taxa de evaporação por hora no período noturno, sendo a taxa de evaporação por hora diurna aproximadamente 150% maior que a taxa noturna.

Tabela 10 – Taxa de evaporação diurna e noturna (mm/h) no reservatório Gavião estimada pelo método de Diferença de pressão

Taxa de Evaporação por hora (mm/h)					
	Dia (06:00 - 18:00)	Noite (18:00 -06:00)		Dia (06:00 - 18:00)	Noite (18:00 -06:00)
11/10/2019	0,60	0,18	14/11/2019	0,65	0,14
12/10/2019	0,50	0,14	15/11/2019	0,33	0,26
13/10/2019	0,59	0,20	16/11/2019	0,33	0,07
14/10/2019	0,40	0,13	17/11/2019	0,40	0,07
15/10/2019	1,00	0,33	18/11/2019	0,26	0,07
16/10/2019	0,54	0,26	19/11/2019	0,59	0,26
17/10/2019	0,39	0,26	20/11/2019	0,27	0,20
18/10/2019	0,46	0,07	21/11/2019	0,39	0,13
19/10/2019	0,34	0,20	22/11/2019	0,40	0,13
20/10/2019	0,33	0,07	23/11/2019	0,26	0,07
22/10/2019	0,38	0,20	24/11/2019	0,39	0,07
23/10/2019	0,39	0,07	25/11/2019	0,33	0,25
24/10/2019	0,26	0,53	26/11/2019	0,21	0,13
25/10/2019	0,66	0,27	27/11/2019	0,41	0,25
26/10/2019	0,26	0,04	28/11/2019	0,34	0,13
27/10/2019	0,48	0,07	29/11/2019	0,33	0,13
28/10/2019	0,46	0,26	30/11/2019	0,40	0,20
29/10/2019	0,52	0,14	01/12/2019	0,33	0,13
30/10/2019	0,46	0,13	02/12/2019	0,46	0,20
31/10/2019	0,46	0,14	03/12/2019	0,39	0,07
06/11/2019	0,85	0,20	04/12/2019	0,46	0,20
07/11/2019	0,40	0,26	05/12/2019	0,30	0,07
08/11/2019	0,46	0,20	06/12/2019	0,53	0,07
09/11/2019	0,39	0,26	07/12/2019	0,29	0,23
10/11/2019	0,40	0,20	08/12/2019	0,33	0,00
11/11/2019	0,42	0,20	09/12/2019	0,40	0,07
12/11/2019	0,59	0,17	10/12/2019	0,32	0,20
13/11/2019	0,29	0,30	11/12/2019	0,33	0,13

5.3 Comparação entre as evaporações estimadas pelos diferentes métodos

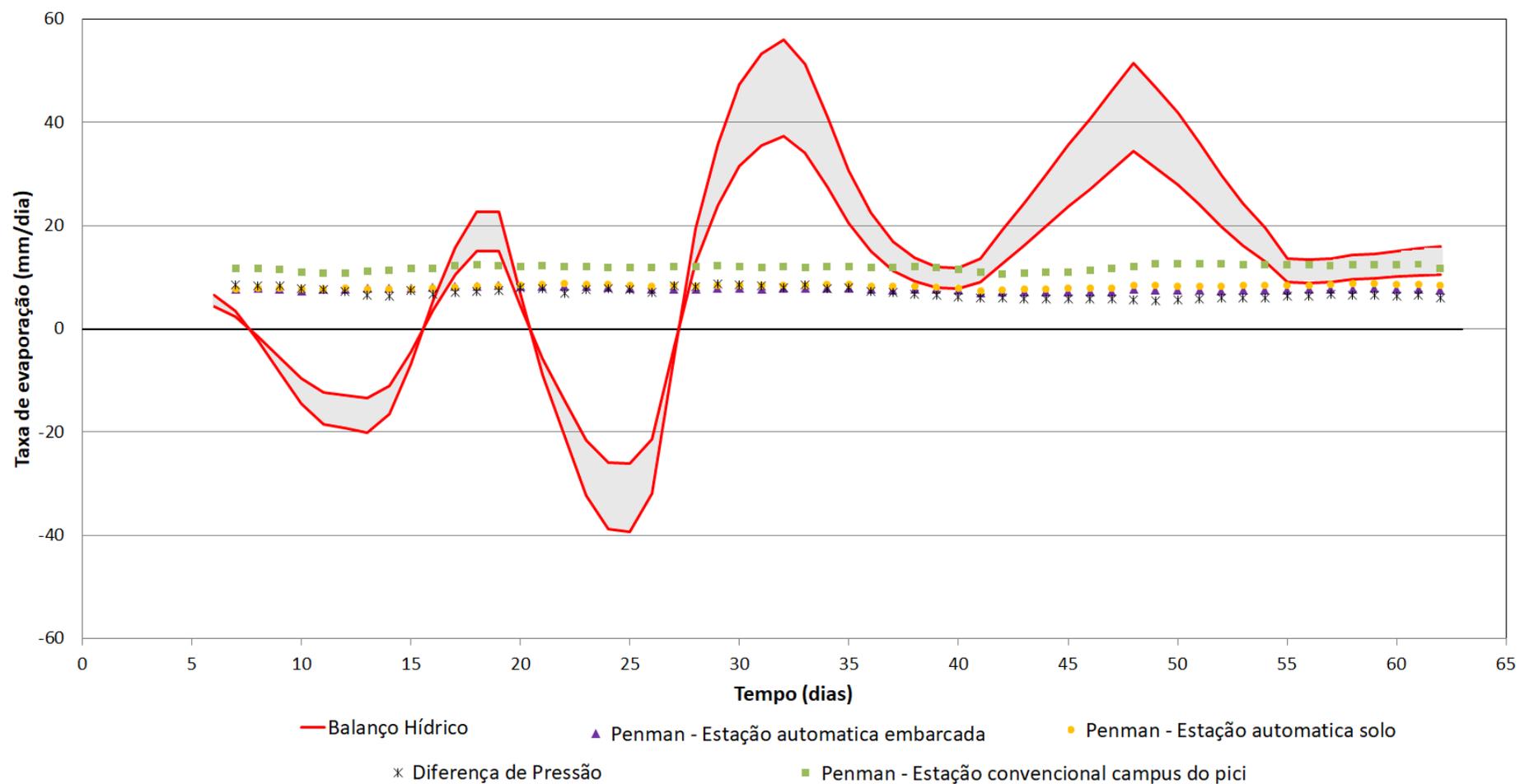
Na Figura 26 estão apresentadas as estimativas da evaporação (média móvel de 7 dias) no reservatório Gavião por meio dos métodos do balanço hídrico, de Penman e pelo sensor de diferença de pressão. A área em cinza representa a faixa de evaporação máxima e mínima no reservatório estimada pelo método do balanço hídrico. Os resultados de evaporação para todo o período considerado nas análises estão disponíveis no Apêndice B.

O método do balanço hídrico, com base em dados diários, apresenta elevada instabilidade apresentando resultados diários não satisfatórios para aplicação prática. Foram observados valores excessivamente altos e excessivamente baixos de evaporação, inclusive valores

negativos de evaporação. Isso que significaria que houve ganho e não perda de água no reservatório, com variação da taxa de evaporação diária de + 60 a - 40 mm/dia. Entretanto, a média do período analisado indica evaporação em torno de 14 mm/dia, valor elevado, mas da mesma ordem de grandeza das demais medições. Essa ampla faixa de variação claramente indica a incerteza do cálculo de evaporação (BIGLARBEIGI et al., 2018) por meio do balanço hídrico para curtos intervalos de tempo (intervalos diários, por exemplo). Isso se verifica mesmo na estação seca, quando a vazão dos rios é desprezível. A incerteza tende a ser maior no Gavião que em outros açudes, uma vez que o mesmo faz parte do sistema interligado que abastece a RMF e, portanto, é abastecido por outros reservatórios. Em açudes que não recebem água de transposição, a incerteza no período seco pode ser inferior àquela observada na presente pesquisa.

O método de Penman possui uma base física realista e é citado na literatura como o que melhor representa a evaporação quando comparado aos métodos convencionais de quantificação da evaporação. Entretanto, é um método sujeito às incertezas das medições das variáveis climáticas. Nota-se que esse método apresentou valores de taxa evaporativa semelhantes, embora superiores, ao método de referência, principalmente quando a estimativa é realizada com base nos dados da estação mais distante do lago, no caso, a do Campus do Pici.

Figura 26 – Evaporação média de 7 dias (mm) no reservatório Gavião para o período de 11 de outubro a 11 de dezembro de 2019 estimada pelos modelos do balanço hídrico, de Penman e pelo sensor de diferença de pressão. A área em cinza representa a faixa evaporação, entre a estimativa de evaporação máxima e de evaporação mínima estimada pelo método do Balanço hídrico, que pode ocorrer no reservatório Gavião.



Na Tabela 11 são apresentadas as taxas diárias de evaporação, assim como os totais evaporados no reservatório Gavião no período de 11 de outubro a 11 de dezembro de 2019 pelos diferentes métodos.

Tabela 11 – Taxas médias de evaporação diária (mm), assim como evaporação total no período do estudo (mm) estimada pelos métodos de Penman, do balanço hídrico e do sensor de diferença de pressão no Açude Gavião, Ceará, entre 11 de outubro e 11 de dezembro de 2019.

Método	Taxa de evaporação (mm)	
	Média diária	Total no período
Método do sensor de diferença de pressão	6,9	395
Método de Penman – Estação embarcada	7,7*	478
Método de Penman – Estação na margem do açude	8,2*	508
Método de Penman – Estação no Campus do Pici	11,8*	734
Método do balanço hídrico (taxa máxima)	13,7*	853
Método do balanço hídrico (taxa mínima)	9,2 ^{ns}	569

* a diferença entre a média do método e do método de referência é significativa pelo teste t de Student, a 5% de probabilidade, ^{ns} a média do método e do método de referência não diferem significativamente pelo teste t de Student a 5% de probabilidade.

Todos os métodos utilizados apresentaram valores de evaporação média superior ao do método de diferença de pressão. A evaporação média foi superestimada em 12% pelo método de Penman baseado nos dados da estação embarcada, o que corresponde a uma diferença de 0,8 mm.d⁻¹. Isso indica um bom resultado, sendo a estimativa mais próxima do método de diferença de pressão. Usando-se o método de Penman baseado nos dados da estação na margem do açude, a superestimativa foi de 19%, o que corresponde a uma diferença de 1,3 mm.dia. Pelo método de Penman baseado nos dados da estação mais distante (19 km), no Campus do Pici, a evaporação média foi superestimada em 71%, o que corresponde a uma diferença de 4,9 mm.d⁻¹, valor destoante dos demais. De acordo com o método do balanço hídrico considerando-se a taxa máxima de evaporação, a superestimada é de quase 100%, o que corresponde a uma diferença de 6,8 mm.d⁻¹, o pior resultado entre os métodos usados. Quando se calculou a taxa mínima de evaporação pelo método do balanço hídrico, a superestimada foi de 33%, o que corresponde a uma diferença de 2,3 mm.d⁻¹.

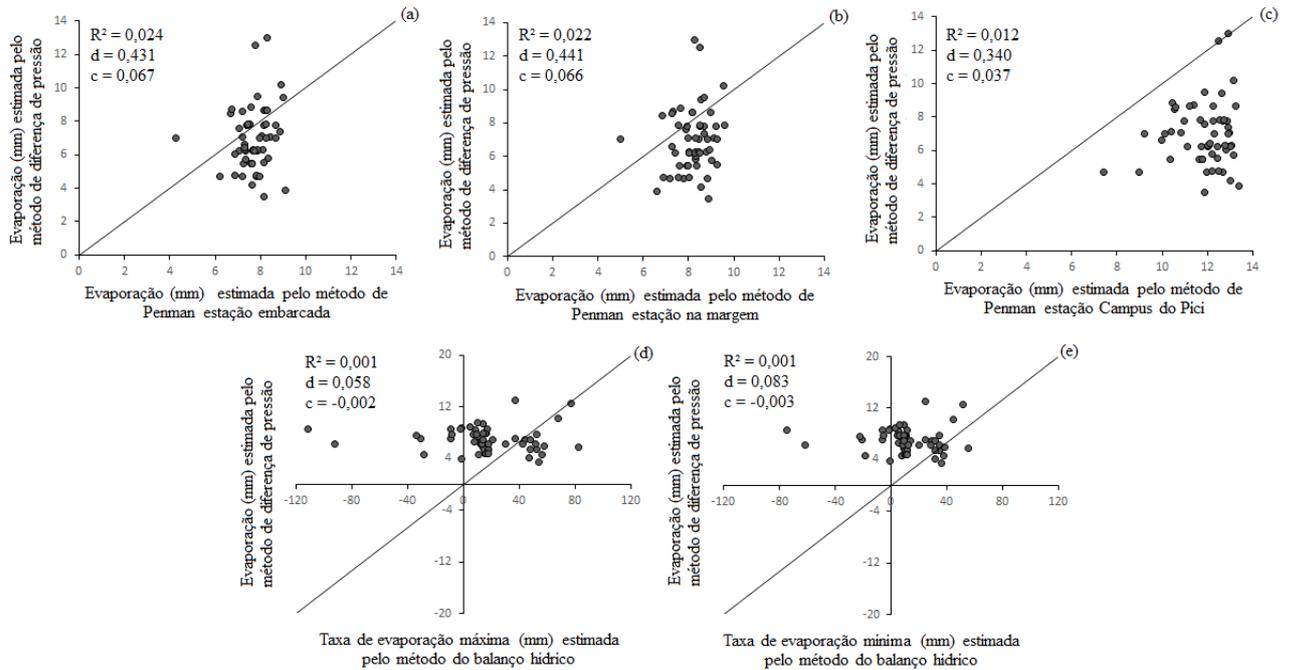
O fato de a estação instalada em terra no Campus do Pici apresentar estimativas de evaporação discrepantes das demais pode ser explicada pelas diferenças microclimatológicas entre o local de medição e o reservatório do Açude Gavião. Outro fator interveniente é que a velocidade do vento na estação convencional do Campus do Pici foi medida a 10 m de altura,

não a 2 m, demandando-se uma correção através de modelo. Além disso, na margem do açude e na estação do Campus do Pici, as barreiras naturais são distintas e podem influenciar a velocidade do vento, já que na estação embarcada as barreiras estão muito distantes. Outro aspecto que pode ter contribuído para essa divergência é que o cálculo da radiação solar global no Campus do Pici foi feito a partir da insolação diária, segundo o método apresentado por Angstrom (1924) e Aguiar et al. (1999), podendo ser fonte de incertezas. Rong et al. (2013), em um estudo de evaporação no lago Dongping, verificaram que os parâmetros climáticos que mais contribuem para o aumento da evaporação são o saldo de radiação e a temperatura. Dantas (2017), em seu estudo de estimativa de evaporação do reservatório Castanhão, no Ceará, observou que as variáveis de maior influência sobre as perdas de água por evaporação foram radiação solar, temperatura máxima do ar e umidade relativa do ar.

Dantas (2017) encontrou uma taxa de evaporação diária de 3,99 mm e de 3,29 mm, no reservatório Castanhão, Ceará, estimadas pelo método Penman utilizando dados de uma estação meteorológica instalada sobre o espelho d'água e de uma estação em terra, respectivamente. Entretanto, os valores medidos nesta pesquisa pelo método de Penman (8 – 12 mm/dia) são compatíveis com valores estimados com base em balanço hídrico na região (MOLLE & CADIER, 1992; ARAÚJO et al. 2006; CAMPOS, 2010).

A Figura 27 mostra a comparação entre a evaporação diária estimada pelo método de referência (diferença de pressão) e as evaporações estimadas pelos métodos convencionais de Penman e do balanço hídrico.

Figura 27 – Comparação entre as evaporações estimadas pelos métodos convencionais de Penman e do Balanço hídrico e o método de referência de diferença de pressão hidrostática na escala diária no reservatório Gavião, Pacatuba, Ceará, Brasil, entre 11 de outubro e 11 de dezembro de 2019.



A análise do desempenho dos métodos tomando o sensor de diferença de pressão como referência pelas medidas de erro e de eficiência é observada na Tabela 12.

Tabela 12 – Análise estatística da correlação entre os métodos convencionais de Penman e do balanço hídrico e o método de referência (pressão hidrostática) na escala diária no reservatório Gavião, Ceará, entre 11 de outubro e 11 de dezembro de 2019.

Método	Índices				Erros			
	R	R^2	d	c	EM	RMSE	EPE	CRM
E_{PN-BEM}	0,155	0,024	0,431	0,067	-0,779	2,406	0,793	-0,113
E_{PN-MGM}	0,149	0,022	0,441	0,066	-1,264	2,287	1,287	-0,183
E_{PN-CP}	0,110	0,012	0,340	0,037	-4,955	5,378	5,043	-0,716
BH_{MAX}	-0,032	0,001	0,058	-0,002	-9,701	34,723	9,875	-1,401
BH_{MIN}	-0,032	0,001	0,083	-0,003	-4,160	22,674	4,234	-0,601

E_{PN-EMB} – Penman com base nos dados da estação embarcada; E_{PN-MGM} – Penman com base nos dados da estação na margem; E_{PN-CP} – Penman com base nos dados da estação do Campus do Pici; BH_{MAX} – Balanço hídrico (taxa máxima); BH_{MIN} – Balanço hídrico (taxa mínima). R^2 = coeficiente de determinação; R = coeficiente de correlação de Pearson; d = índice de concordância; c = índice de desempenho; EM = erro médio; RMSE = a raiz quadrada do erro quadrático médio; EPE = erro padrão da estimativa; CRM = coeficiente de massa residual.

Os valores apresentados na Tabela 4 demonstraram que não houve bom ajuste em todos os casos, com os valores de R próximos a zero, que indicam baixas precisões das estimativas para todos os métodos avaliados, variando de -0,032 a 0,155. Os coeficientes de correlação R^2 foram também bastantes próximo a zero, variando de 0,001 a 0,024. O índice de concordância (d) também não apresentou valores satisfatórios ficando para todos os métodos abaixo de 0,5. Esses resultados indicam que os métodos de Penman (para estação distante do lago) e do balanço hídrico estimaram os valores de evaporação com pouca exatidão, ou seja, ocorreu um alto desvio entre eles e os valores do método de referência.

No estudo de Leão et al. (2013), o método de Penman foi considerado apropriado para a estimativa da evaporação na barragem de Banabuiú, situada no semiárido nordestino, durante a estação seca, uma vez que os índices estatísticos indicam um desempenho “ótimo” para o método de estimativa da evaporação como um componente do balanço hídrico. Em Cabrera et al. (2016), o método Penman teve desempenho classificado como "muito bom" na região central de São Paulo (Itirapina, SP), apresentando os melhores índices para o período seco, quando os resultados foram comparados com a evaporação observada em tanque padrão de 20 m². Segundo Leitão et al. (2007), para o reservatório Boqueirão e Patos, na Paraíba, nas regiões do Cariri e Sertão, o método de Penman teve desempenho classificado como "bom" e "sofável", respectivamente. Foi o método que teve o pior desempenho na estimativa da evaporação, quando os resultados foram comparados com a evaporação observada em tanque padrão de 20 m².

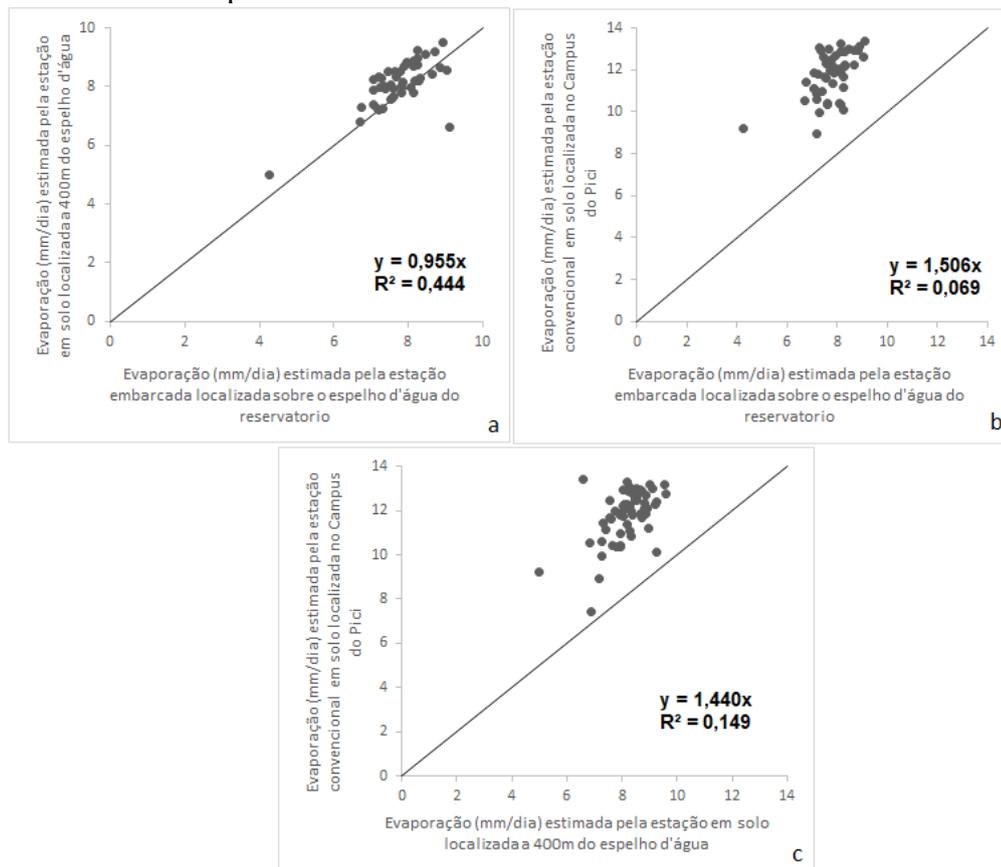
Devido à grande amplitude e oscilação dos dados diários do método do balanço hídrico ambas as hipóteses, taxa máxima e taxa mínima, apresentaram alto valor de RMSE, indicando que as estimativas diárias de evaporação do método apresentaram grandes diferenças das estimativas do método de referência, já que o índice penaliza os erros de magnitudes mais elevadas. Isso indica que o balanço hídrico é menos preciso que o método de Penman, mesmo para estações distantes (no caso, 19 km) do lago. Entretanto, observa-se que a estimativa de evaporação pelo método do balanço hídrico (taxa mínima) apresentou valores de EM, CRM e EPE menores que a estimativa pelo método de Penman, baseado nos dados da estação do Campus do Pici.

5.4 Comparação entre as evaporações estimadas por Penman pelas diferentes estações meteorológicas

Na Figura 28 são apresentados os gráficos de ajuste de uma regressão linear simples, forçando a reta a passar pela origem, ou seja, eliminando o valor da constante ($a = 0$) e a reta 1:1 entre os resultados de evaporação estimados a partir da estação localizada no reservatório com os resultados das duas estações que se localizam no entorno do reservatório de Gavião.

Os coeficientes de determinação (R^2) foram baixos, apresentando um valor de 0,44 entre as estimativas da estação embarcada e a estação instalada na margem do açude a 400m do espelho d'água, e de 0,069 entre as estimativas da estação embarcada e a estação convencional localizada em solo no Campus do Pici (a 19 km do espelho d'água), e de 0,149 entre as estimativas da estação instalada na margem do açude a 400m do espelho d'água e a estação convencional localizada em solo no Campus do Pici, indicando que não há uma boa concordância entre as estimativas usando dados dos diferentes postos de coleta (Figura 28 a, b, c).

Figura 28 – Comparação entre a evaporação estimada pelo método de Penman (1948) usando dados de uma estação embarcada no reservatório Gavião e das estações localizadas em terra. O período dos dados corresponde a 11 de outubro a 11 de dezembro de 2019.



Foi aplicado o teste “t” de Student para verificar se a evaporação estimada pela estação do reservatório de Gavião e pelas estações vizinhas são estatisticamente iguais. Na Tabela 13 observam-se os valores do T do teste de t-Student para um intervalo de confiança de 95% e o p-value que é a probabilidade que mede a evidência contra a hipótese nula demonstrando que as estimativas de evaporação não são estatisticamente iguais.

Tabela 13 – Índices estatísticos para análise da concordância entre os métodos de estimativa de evaporação no Açude Gavião, entre 11 de outubro e 11 de dezembro de 2019.

Estação	a	b	R²	p-value
Estação Embarcada – Estação na margem do açude	0	0,955	0,444	0,03586
Estação Embarcada – Estação Campus do Pici	0	1,506	0,069	1,97E-35
Estação Solo – Estação Campus do Pici	0	1,440	0,149	2,64E-41

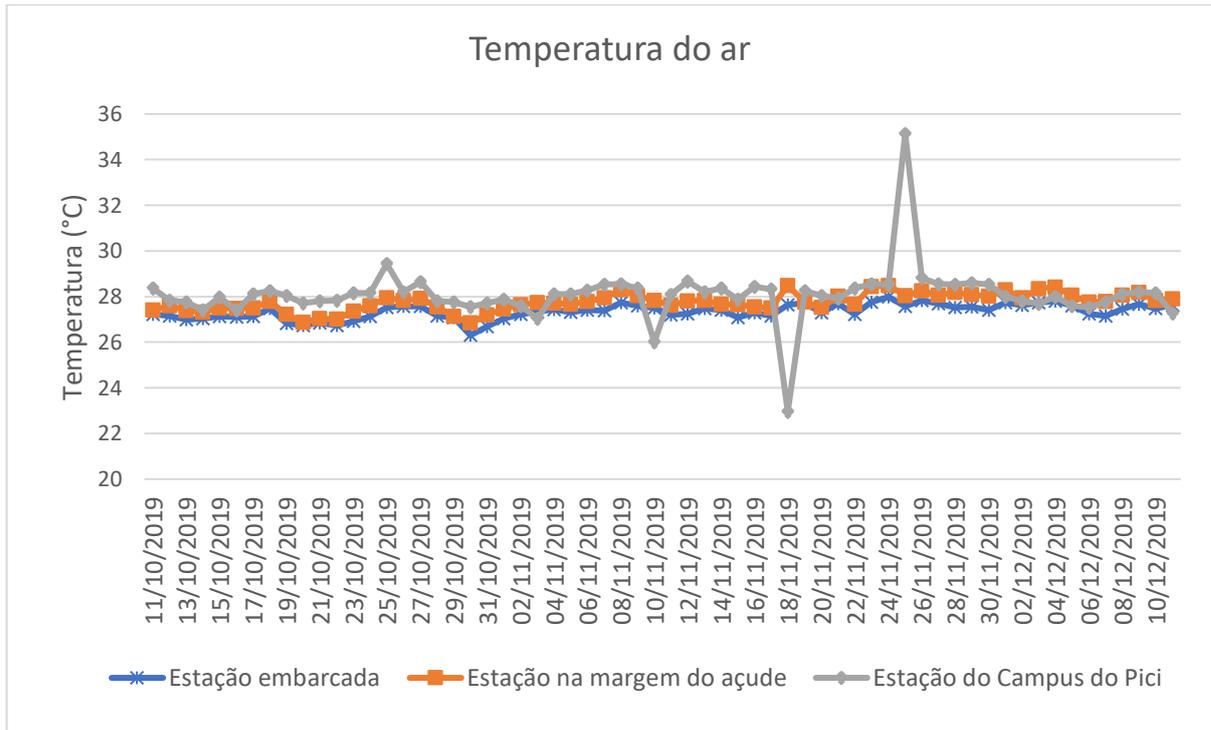
a = coeficiente linear da reta de ajuste, b = coeficiente angular da reta de ajuste, R² = coeficiente de determinação; p-value = probabilidade que mede a evidência contra a hipótese nula.

A estação instalada na margem do açude Gavião e a estação do Campus do Pici superestimam a evaporação média da estação instalada sobre o espelho d’água do açude Gavião em 5,4% e 52,4%, respectivamente. Em média, a evaporação estimada pela estação embarcada é de 7,8 mm/dia, na estação na margem do açude é de 8,2 mm/dia e na estação convencional do Campus do Pici é de 11,8 mm/dia.

Dantas (2017), no seu estudo de estimativa de evaporação do reservatório Castanhão, no Ceará, obteve como resultados que a evaporação estimada através dos dados da estação meteorológica instalada na água foi superior em 0,79 mm à evaporação medida na terra. Sendo a evaporação média na água de aproximadamente 18% maior que a média de evaporação terrestre, ao contrário do que foi encontrado no presente estudo, onde a evaporação na água foi menor que a evaporação medida na terra. Vieira (2015), em seu estudo de estimativa de evaporação do reservatório Sobradinho, na Bahia, observou que a evaporação terrestre é 6% menor que a evaporação na água.

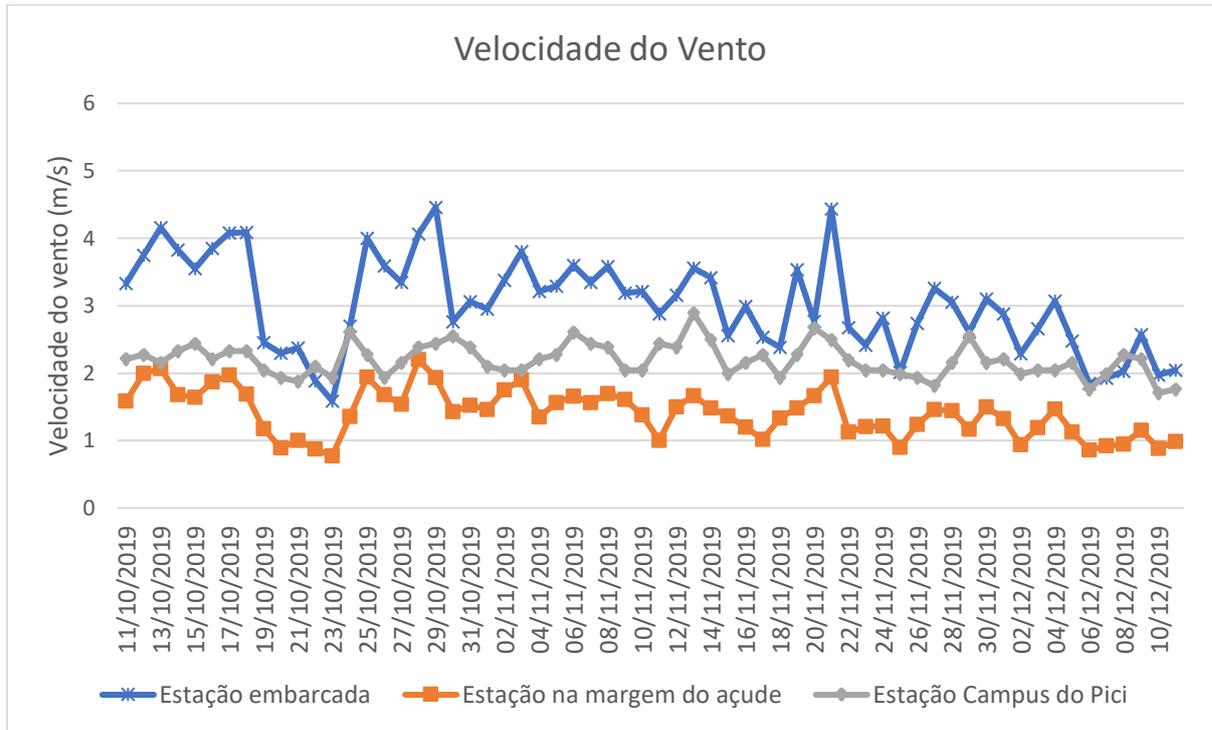
A temperatura do ar é maior nas estações do entorno, principalmente na estação convencional do Pici, onde a temperatura máxima chega a ser 25% superior à da estação embarcada (Figura 29). A temperatura máxima na estação automática embarcada é de 28,0°C, na estação automática na margem do açude é de 28,5°C, já na estação convencional no Campus do Pici é de 35,0°C.

Figura 29 – Temperatura do ar diária para o período de 11 de outubro a 11 de dezembro de 2019 das estações meteorológicas: embarcada, na margem do açude e do Campus do Pici.



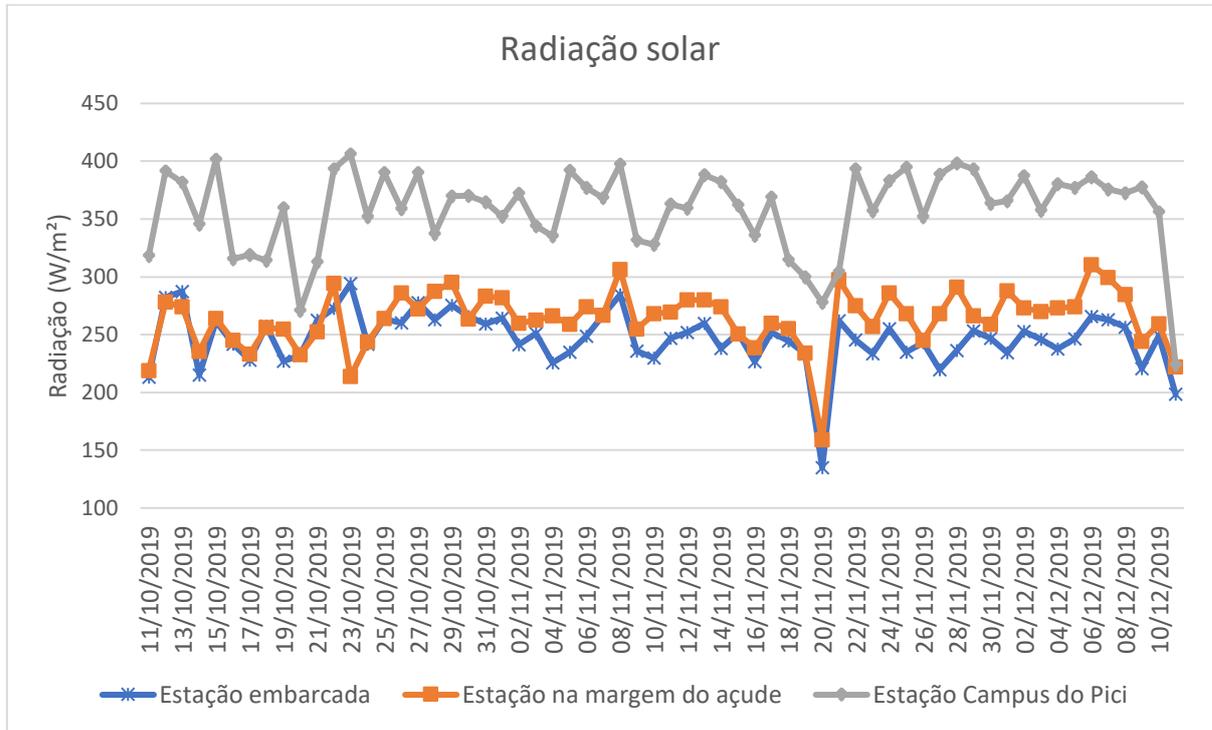
Em relação à velocidade do vento (Figura 30), nota-se uma subestimativa das estações de entorno do reservatório em relação à estação embarcada, onde a velocidade média do vento na estação embarcada é de 3,18 m/s, na estação instalada na margem do açude é de 1,49 m/s e na estação convencional do campus do Pici é de 2,24 m/s, desta forma, há uma subestimação de 53,14% e 29,5%, respectivamente. A velocidade do vento na estação convencional do Campus do Pici pode possuir erros embutidos devido ao fato de a velocidade do vento a 2 m de altura ter sido estimada, a partir da velocidade obtida a 10 m de altura, podendo ser fonte considerável de erros. Como também, na margem do açude e na estação do Campus do Pici, as barreiras naturais podem influenciar nessa redução da velocidade, enquanto que na estação embarcada o açude é uma grande área aberta, sem barreiras.

Figura 30 – Velocidade do vento diária para o período de 11 de outubro a 11 de dezembro de 2019 das estações meteorológicas: embarcada, na margem do açude e do Campus do Pici.



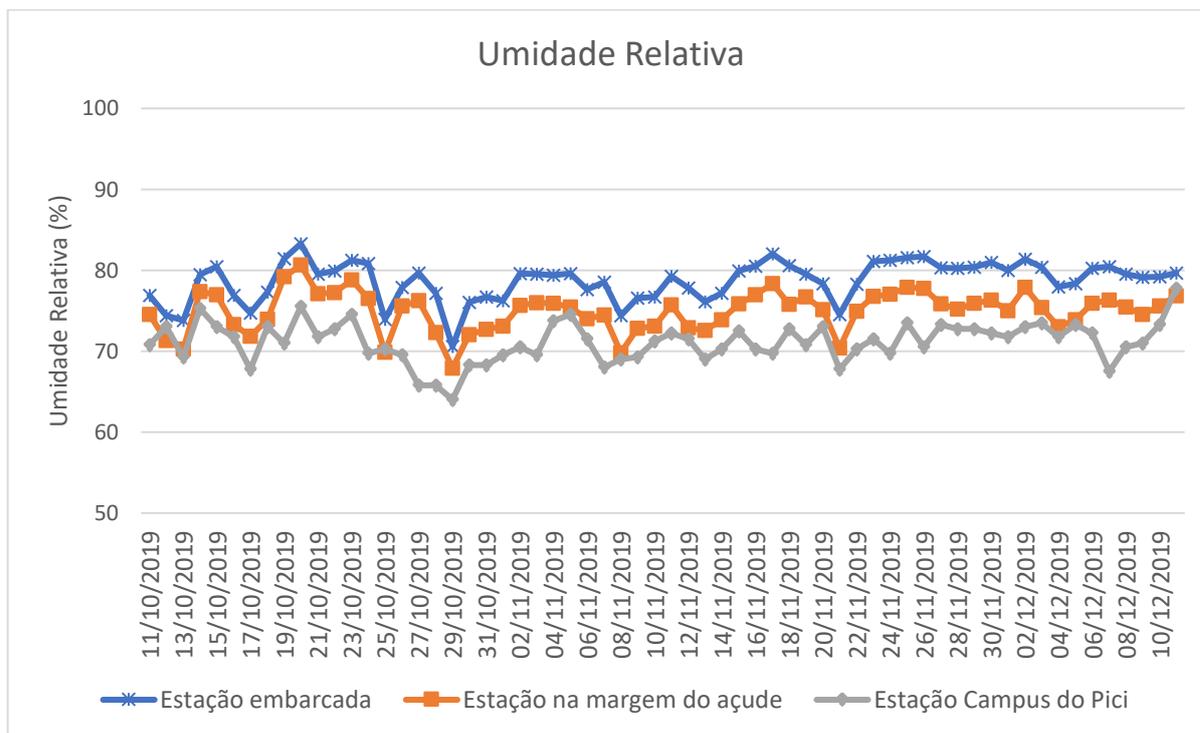
Em relação à radiação solar (Figura 31), nota-se uma superestimativa de 44,1% e de 6,2% da radiação solar média na estação convencional do campus do Pici e da estação na margem do açude em relação à estação embarcada, respectivamente. A radiação solar média na estação embarcada é de 248 W/m², na estação na margem do açude é de 264 W/m² e na estação convencional do Campus do Pici é de 358 W/m².

Figura 31 – Radiação solar diária para o período de 11 de outubro a 11 de dezembro de 2019 das estações meteorológicas: embarcada, na margem do açude e do Campus do Pici.



Em relação à umidade relativa do ar (Figura 32), nota-se uma subestimativa de 9,17% e de 4,28% da umidade relativa na estação convencional do campus do Pici e da estação na margem do açude em relação à estação embarcada, respectivamente. A umidade relativa média na estação embarcada é de 78,3%, na estação instalada na margem do açude é de 75,0% e na estação convencional do campus do Pici é de 71,1%.

Figura 32 – Umidade relativa diária para o período de 11 de outubro a 11 de dezembro de 2019 das estações meteorológicas: embarcada, na margem do açude e do Campus do Pici.



5.5 Análise de sensibilidade do modelo Penman às variáveis climáticas radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento

Na Tabela 14 é apresentado o Índice de Sensibilidade–IS do modelo de Penman à temperatura do ar, velocidade do vento, radiação solar e umidade relativa.

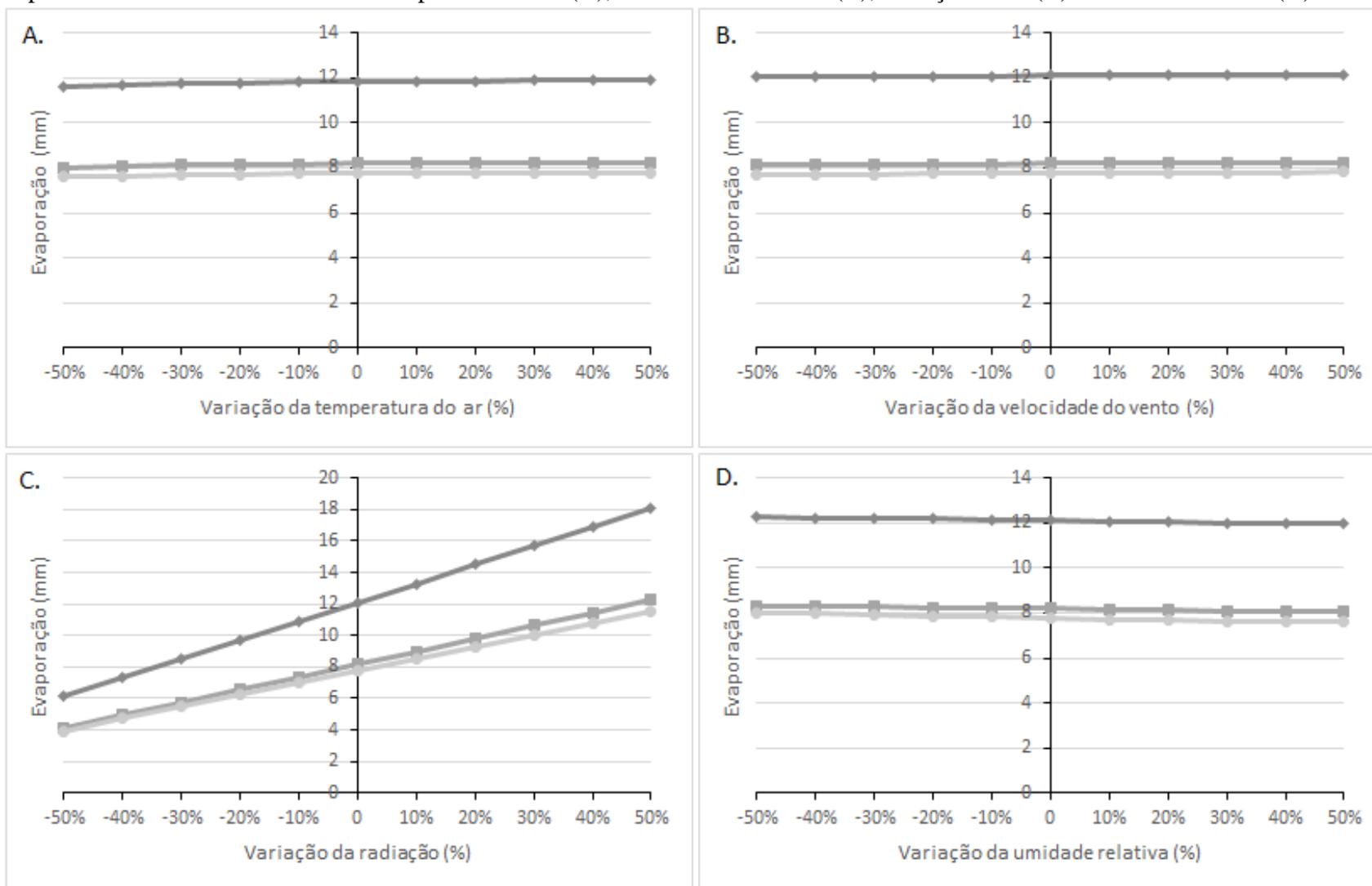
Tabela 14 – Índice de sensibilidade (IS) do modelo de Penman as variáveis climáticas: temperatura do ar, velocidade do vento, radiação solar e umidade relativa, no período de 11 de outubro a 11 de dezembro de 2019 das estações meteorológicas: embarcada, na margem do açude e do Campus do Pici.

Índice de Sensibilidade (IS)			
	Estação meteorológica automática - Embarcada	Estação meteorológica automática – na margem do açude	Estação meteorológica convencional – Campus do Pici
Temperatura do ar	0,002	0,002	0,024
Vel. Vento	0,014	0,007	0,008
Radiação solar	0,982	0,989	0,988
Umidade Relativa	0,065	0,033	0,029

Analisando os dados da Tabela 14, percebe-se que dentre as variáveis climáticas analisadas, o modelo de Penman é mais sensível à radiação solar, apresentando um IS bem próximo a 1, do que as outras analisadas. Isso corrobora com o estudo de Vieira (2015), que

também utilizou o Índice de Sensibilidade (IS) para avaliar a sensibilidade dos modelos de estimativa de evaporação às variáveis climáticas de entrada nos modelos. Entre os modelos de evaporação analisados, o modelo de Penman apresentou mais sensibilidade em relação à variação de insolação, temperatura e velocidade do vento. Entretanto, diferente do que foi notado por Vieira (2015), teve-se uma menor sensibilidade à temperatura do ar, principalmente nas estimativas das estações meteorológicas automáticas embarcada e instalada em solo que apresentaram IS bem próximos a zero, e a velocidade do vento apresentando IS de 0,01. Dantas (2017), em seu estudo de estimativa de evaporação do reservatório Castanhão, no Ceará, observou que as variáveis de maior influência sobre as perdas de água por evaporação foram radiação solar, temperatura máxima do ar e umidade relativa do ar. Na Figura 33 encontram-se disponíveis os gráficos relativos à análise de sensibilidade às variáveis meteorológicas (temperatura do ar, velocidade do vento, radiação solar e umidade relativa) de entrada no modelo. Por meio das curvas apresentadas, é possível perceber a resposta na evaporação quando se modifica os dados de entrada.

Figura 33 – Sensibilidade do modelo de Penman (1948) usando dados de uma estação embarcada no reservatório Gavião e das estações localizadas em terra aos parâmetros climáticos relativos à temperatura do ar (A), velocidade do vento (B), radiação solar (C) e umidade relativa (D).



A variação de 10% dos valores de entrada relativos à insolação, tanto para positivo quanto negativo, repercute em uma variação nos resultados de evaporação de 10% para o método de Penman estimado pelas diferentes estações meteorológicas. Quando a variação dos valores de entrada relativos à insolação foi de 50%, para positivo e negativo, ocorre uma mudança nos resultados da ordem de 50% para todas as estimativas das diferentes estações meteorológicas. Sendo dentre as variáveis climáticas avaliadas a radiação solar a que apresenta a maior variação nos resultados, conforme pode ser visto na inclinação das retas na Figura 33.

Uma variação de 10% dos valores de entrada da umidade relativa, tanto para positivo quanto negativo, repercute em uma variação nos resultados de evaporação de 0,6% e 0,4% para o método de Penman estimado pela estação meteorológica automática embarcada e na instalada na margem do açude, respectivamente. Já a estação convencional do Campus do Pici quando o valor de entrada da umidade relativa é alterado em +10% ocorre uma mudança no resultado de evaporação de 0,3%, e quando o valor da umidade relativa é alterado em -10% ocorre uma mudança no resultado de evaporação de -0,25%. Ao aumentar o valor de entrada da umidade relativa esta chega ao seu valor máximo, atingindo o valor de 100% de umidade relativa, ao incrementa-la em +40% nas estações meteorológicas automática instalada na margem do açude e na convencional do Campus do Pici, alterando seus resultados em 1,7% e 1,4%, respectivamente. Já a estação meteorológica automática embarcada atingi umidade relativa máxima a partir do incremento de +30%, alterando o resultado em 3,2%. Quando a variação dos valores de entrada relativos à umidade relativa foi de -50%, negativo, ocorre uma mudança nos resultados da ordem de 1,8% para estação automática embarcada, e de 1,1% para estações meteorológicas automática instalada na margem do açude e convencional do Campus do Pici. A variação referente à umidade relativa é a segunda maior variação entre as variáveis climáticas analisadas.

Em relação a variação dos valores de entrada relativos à temperatura do ar, uma variação de -10% repercute em uma variação nos resultados de evaporação de -0,25% para o método de Penman estimado pelas diferentes estações meteorológicas. Para variação de +10% há uma repercussão no resultado de evaporação em 0,1% para o método de Penman estimado pela estação meteorológica automática instalada na margem do açude e para estação convencional do Campus do Pici. Enquanto que uma variação de +10% há uma repercussão no resultado de evaporação em 0,3% para o método de Penman estimado pela estação meteorológica automática embarcada. Quando à variação dos valores de entrada relativos à temperatura do ar foi de -50% ocorre uma mudança nos resultados de evaporação de -2,1% para o método de Penman estimado pelas diferentes estações meteorológicas. A variação de +50%

dos valores de entrada relativos à temperatura do ar repercute em uma variação nos resultados de evaporação de 0,5%, de 0,4% e de 0,25% para estação automática embarcada, para a estação automática instalada na margem do açude e para estação convencional do Campus do Pici, respectivamente.

Já para a variação de 10% dos valores de entrada relativos à velocidade do vento, tanto para positivo quanto negativo, repercute em uma variação nos resultados de evaporação na ordem de 0,1% para o método de Penman estimado pelas diferentes estações meteorológicas. Quando a variação nos dados de entrada foi de 50%, para positivo e negativo, ocorre uma mudança nos resultados da ordem de 0,4% para estações meteorológicas automáticas instaladas na margem do açude e convencional do Campus do Pici. Já para a estação automática embarcada as porcentagens não são as mesmas quando a variação é positiva ou negativa, quando a variação nos dados de entrada foi de 50%, o resultado se alterou em 0,8%, e quando a variação nos dados de entrada foi de -50% (negativa, portanto), o resultado se alterou em -0,6%. Dentre as variáveis climáticas analisadas a velocidade do vento foi a que apresentou menores variações dos resultados com a variação dos dados de entrada. Desta forma, podemos concluir que há uma baixa sensibilidade do método para a velocidade do vento.

Provavelmente as estações ao entorno superestimaram a evaporação no reservatório quando se aplica o método de Penman por apresentarem dados de radiação solar maiores, principalmente na estação localizada no Campus do Pici, do que no reservatório, chegando a ser 44% maior. Tal fator pode ter contribuído para a superestimava da evaporação, já que o método apresenta uma forte sensibilidade a variação da radiação solar.

6 CONCLUSÕES

Comparando-se os resultados dos métodos convencionais de quantificação da evaporação (Penman e balanço hídrico) com os valores obtidos pelo método de referência (sensor de diferença de pressão), observou-se que aqueles superestimaram a evaporação no açude tropical Gavião, Ceará (outubro a dezembro de 2019). O método de Penman usando dados da estação embarcado apresentou resultado mais próximo ao de referência (sensor de diferença de pressão) mostrando ser o mais favorável na escala diária e uma boa alternativa ao método de medida direta de evaporação. O método do balanço hídrico, considerando-se a taxa máxima de evaporação, apresentou diferença de 100% em relação ao método de referência, o pior resultado entre os métodos usados.

Ao comparar as estimativas de evaporação pelo método de Penman no reservatório Gavião, observou-se que a estação localizada na margem do açude e a estação do Campus do Pici, distante do reservatório, superestimaram a evaporação medida sobre o espelho d'água. Quanto ao efeito da localização da estação meteorológica na estimativa da evaporação, observou-se que a evaporação estimada por estações meteorológicas com diferentes proximidades do espelho d'água difere estatisticamente daquela obtida pela estação sob o espelho d'água. Além disso, o modelo de Penman apresentou maior sensibilidade à radiação solar e menor sensibilidade à temperatura do ar.

Conclusivamente, podemos afirmar, com base nos dados levantados nessa pesquisa, que os dois métodos amplamente usados no semiárido brasileiro, quais sejam, (1) o do balanço hídrico com a hipótese de infiltração desprezível; e (2) o de Penman baseado em dados de estações localizadas em terra e distantes do lago não são confiáveis, principalmente para a escala temporal diária. Desta forma, recomenda-se que, para o cálculo da evaporação diária através do método tradicional de Penman, sejam utilizados dados de estações meteorológicas o mais próximo possível do espelho d'água, quando não for possível a instalação de uma estação sobre o espelho d'água.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, J. V. de; NOGUEIRA, S.M.; ARAÚJO, E. C. B.de; CRISÓSTOMO JR., R. R.; CAVALCANTE, J. C. S. Estimativa da radiação solar a partir da insolação, na Região Metropolitana de Fortaleza, CE. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA*, 1999, Florianópolis. **Anais [...]**. Florianópolis: SBAGRO, 1999. Disponível em: <http://www.sbagro.org/files/biblioteca/304.pdf>. Acesso em: 22 out. 2018.
- ALMEIDA, H. A.; SOUZA, J. A.; ALCANTARA, H. M. Análise comparativa de dados meteorológicos obtidos por estação convencional e automática no semiárido paraibano. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 16, n. 1, p. 58-66, 2008.
- ANGSTROM, A. Solar and terrestrial radiation. **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**, Bracknell, v. 50, p.21-125, 1924.
- ANA, Agência Nacional de águas. **Atlas Brasil: Abastecimento urbano de água**. Brasília: Engecorps/Cobrape, 2010.
- ARAGÃO ARAÚJO, J. A. **Barragens do Nordeste do Brasil**. Fortaleza: DNOCS, 1992.
- BAUSCH, W. C. Sensor height effects on calculated reference evapotranspiration. **Transactions of the ASAE**, v. 33, n. 3, p. 791-798. 1990.
- BENZAGHTA, M. A.; MOHAMMED, T. A.; GHAZALI, A. H.; SOOM, M. A. M. Comparison of evaporation estimate models for surface evaporation in semi-arid region of Libya: a case study. **Canadian Journal of Civil Engineering**, v. 38, n. 12, p. 1373-1380, 2011.
- BORGES, T. K. S. **Evaporação em superfície de água livre com baixa turbidez**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, BA, 133 f., 2017.
- BUENO, E. O.; MELLO, C. R.; ALVES, G. J. Evaporation from Camargos hydropower plant reservoir: water footprint characterization. **Revista Brasileira de Recursos hídricos**, Porto Alegre, v. 21, n. 3, p. 570-575, 2016.
- CABRERA, M.C.M. et al. Performance of evaporation estimation methods compared with standard 20 m² tank. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 20, p. 874–879, 2016.
- CAMARGO, A. P; SENTELHAS, P. C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativas da evapotranspiração potencial no Estado de São Paulo, Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 5, p. 89-97, 1997.
- CAMPOS, J.N.B et al. Sobre a eficiência de pequenos e grandes reservatórios. Disponível em: http://www.deha.ufc.Br/Nilson/trab_pub.html. Acesso em: 2 ago. 2019.
- CAMPOS, J.N.B. Paradigms and public policies on drought in Northeast Brazil: a historical perspective. **Environmental Management**, v. 55, n.5, p. 1052-1063, 2015.

CAMPOS, J. N. B. Modeling the yield–evaporation–spill in the reservoir storage process: The regulation triangle diagram. **Water Resources Management**, v. 24, n. 13, p. 3487–3511, 2010.

CEARÁ. **Plano de Gerenciamento das Águas das Bacias Metropolitanas**. Relatório de Fase I - Tomo I - Diagnóstico e Estudos Básicos. Fortaleza: SRH/COGERH/VBA Consultores, 1999.

CEARÁ. Secretaria dos Recursos Hídricos. **ATLAS**. Fortaleza: SRH, 2008. Disponível em: www.srh.ce.gov.br. Acesso em: 2 ago. 2019.

CEARÁ. Assembleia Legislativa do Estado do Ceará. **Caderno regional das bacias Metropolitanas**. Fortaleza: SRH, 2009.

CEARÁ. **Plano de Segurança Hídrica da Região Metropolitana de Fortaleza**. Fortaleza: SRH, 2016.

CGEE. **A Questão da Água no Nordeste**, Organizador: Antônio Rocha Magalhães, Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, Agência Nacional de Águas – Brasília, DF: CGEE. 2012.

CHOW, V. T., MAIDMENT, D. R., & MAYS, L. W. **Applied hydrology**. New York: McGraw-Hill, 1988.

COGERH. Portal Hidrológico. 2018. Disponível em: www.hidro.ce.gov.br. Acesso em: 23 nov. 2018.

COLLISCHONN, Walter; TASSI, Rutinéia. **Apostila: Introduzindo Hidrologia**. Versão 8. Porto Alegre: IPH UFRGS, 2011.

DANCEY, C. & REIDY, J. **Estatística Sem**. [s.l.]: [s.n], 2006.

DANTAS, S.P. **Açudagem no Nordeste brasileiro e no Ceará: estimativa de evaporação do açude Castanhão em um ano seco**. TESE (Doutorado) – Geografia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 196f., 2017.

De ARAÚJO, J. C., GUNTNER, A., BRONSTERT, A. Loss of reservoir volume by sediment deposition and its impact on water availability in semiarid Brazil, **Hydrological Sciences-Journal-des Sciences Hydrologiques**, v. 51, n.1, p.157 – 170, 2006.

DUAN, Z.; BASTIAANSEN, W. G. M. Estimating water volume variations in lakes and reservoirs from four operational satellite altimetry databases and satellite imagery data. **Remote Sensing of Environment**, v. 134, p. 403-416, 2013.

ELSAWWAF, M.; WILLEMS, P.; PAGANO, A.; BERLAMONT, J. Evaporation estimates from Nasser Lake, Egypt, based on three floating station data and Bowen ratio energy budget. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 100, n. 3- 4, p. 439-465, 2010.

EVANGELISTA, A. W. P. **Metodologia para dimensionamento e manejo de sistemas de drenagem agrícola**. 2003. 102 f. Tese (Doutorado) - Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2003.

FONTES, A.S. **Estudo da evaporação em reservatórios situados em região semi-árida: uso de bacia experimental**. Dissertação (Mestrado) - Engenharia Ambiental e Urbana, Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, 210 f., 2005.

FONTES, A. S.; OLIVEIRA, J.I.R. de; MEDEIROS, Y.D.P.; A evaporação em açudes do semi-árido nordestino do Brasil e a gestão das águas. *In*: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 15., 2003, Curitiba. **Anais [...]**. Curitiba: [s.n.], 2003. Disponível em: <http://www.grh.ufba.br/Publicacoes/Artigos/Artigos%202003/a%20evapora%C3%A7%C3%A3o%20em%20a%C3%A7udes%20IV%20Simp%C3%B3sio%20Brasileiro%20de%20Rec.%20H%C3%ADD.pdf>. Acesso em: 4 out. 2019.

FREIRE, R.H.F. **Contribuição ao conhecimento limnológico de reservatórios do semi-árido brasileiro que abastecem a Região Metropolitana de Fortaleza: Açudes Pacajus e Gavião (Ceará, Brasil)**. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, SP, 246 f., 2007.

FUNCEME. **Caracterização das bacias hidrográficas do estado do Ceará**. Fortaleza: FUNCEME, 2009.

GALLEGO-ELVIRA B., MARTÍNEZ-ALVAREZ V., PITTAWAY P., BRINK G, MARTÍN-GORRIZ B. Impact of micrometeorological conditions on the efficiency of artificial monolayers in reducing evaporation. **Water Resources Management**. v. 27, p. 2251–2266, 2013.

GOLDBACH, A. e KUTTLER, W. Turbulent heat fluxes above a suburban reservoir: a case study from Germany. **Journal of Hydrometeorology**, v. 16, n. 1, p. 244- 260, 2015.

JENSEN, M. E. e ALLEN, R. G. Evaporation, Evapotranspiration, and Irrigation Water Requirements. **American Society of Civil Engineers**, 2ª Ed., 2016.

KAMPF, S. K.; BURGESS, S. J. Quantificando o balanço hídrico em um enredo plano planalto: Efeitos de erros de medição na previsão de fluxo. **Journal of Hydrology**, v. 380, n. 1, p. 191-202, 2010.

KROL, M.S.; VRIES, M.J.; VAN OEL, P.R.; DE ARAÚJO, J.C. Sustainability of small reservoirs and large scale water availability under current conditions and climate change. **Water Resources Management**, v. 25, p. 3017-3026, 2011.

LEÃO, R.A.O.; SOARES, A.A.; TEIXEIRA, A.S.; SILVA, D.D. da. Estimativa da evaporação no açude Banabuiú, no Estado do Ceará, por diferentes métodos combinados, derivados da equação de Penman. **Engenharia Agrícola**, v. 33, n. 1, p. 129-144, 2013.

LEITÃO, M. de M.V.B.R.; OLIVEIRA, G.M de; LEITÃO, T.J.V. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evaporação para duas regiões da Paraíba, **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 6, p. 585–593, 2007.

LELIS, T.A.; CALIJURI, M.L.; SANTIAGO, A. da F.; LIMA, D.C. de; ROCHA, E. de O. Análise de sensibilidade e calibração do modelo SWAT aplicado em bacia hidrográfica da

região sudoeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Porto Alegre, v. 36, p. 623-634, 2012.

LINACRE, E.T. Data-sparse estimation of lake evaporation using a simplified Penman equation. Elsevier Science Publishers B.V. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 64, p. 237-256, 1993.

MAJIDI, M., ALIZADEH, A., FARID, A., VAZIFEDOUST, M. Estimating evaporation from lakes and reservoirs under limited data condition in a semi-arid region. **Water Resources Management**, v.29, p. 3711-3733, 2015.

MARENGO, J. A. Vulnerabilidade, impactos e adaptação à mudança do clima no semi-árido do Brasil. **Parcerias Estratégicas**, n. 27, p. 149–175, 2008.

MARENGO, J. A.; TORRES, R. R.; ALVES, L. M. Drought in Northeast Brazil—past, present, and future. **Theoretical and Applied Climatology**, p. 1-12, 2016.

MARTÍNEZ-ALVAREZ, V., GONZÁLEZ-REAL, M.M., BAILLE, A., MAESTRE VALERO, J. F. Regional assessment of evaporation from agricultural irrigation reservoirs in a semiarid climate. **Agricultural Water Management**, v. 95, p.1056-1066, 2008.

MARTINS, EDUARDO SÁVIO P.R.; DE NYS, ERWIN; MOLEJÓN, CARMEN; BIAZETO, BRUNO; SILVA, ROBSON FRANKLIN V.; ENGLE, NATHAN. **Monitor de Secas do Nordeste, em busca de um novo paradigma para a gestão de secas**, 1ª Edição, Série Águas Brasil, v. 10, Brasília: Banco Mundial, 2015.

MCJANNET, D.L., WEBSTER, I.T., COOK, F.J. An area-dependent wind function for estimating open water evaporation using landbased meteorological data. **Environmental Model Software**, v. 31, p.76–83, 2012.

MEDEIROS, P.H.A.; DE ARAÚJO, J.C. Temporal variability of rainfall in a semiarid environment in Brazil and its effect on sediment transport processes. **Journal of Soils and Sediments**, v. 14, p. 1216-1223, 2014.

MOLLE, F. **Perdas por evaporação e infiltração em pequenos açudes**. Série Brasil. Recife: SUDENE, 1989.

MOLLE, F.; CADIER, E. **Manual do pequeno açude**. 1. ed. Recife: SUDENE/Cooperación Française/ORSTOM, 1992.

OLIVEIRA, A. D.; ALMEIDA, B. M.; CAVALCANTE JR, E. G.; SOBRINHO, J. E.; VIEIRA, R. Y. M. Comparação de dados meteorológicos obtidos por estação convencional e automática em Jaboticabal-SP. **Revista Caatinga**, v. 23, n. 4, p. 108-114, 2010.

PENMAN, H. L. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. **Proceedings of the Royal Society**, v. 193, p. 120-145, 1948.

PEREIRA, L. M. P., CARAMORI, P. H., RICCE, W. S., CAVIGLIONE, J. H. Análise comparativa de dados meteorológicos obtidos por estação convencional e automática em Londrina. **Semana: Ciências Agrárias**, v. 29, n. 2, p. 299-306, 2008

PEREIRA, S.B.; PRUSKI, F.F.; SILVA, D.D. da; RAMOS, M.M. Evaporação líquida no lago de Sobradinho e impactos no escoamento devido à construção do reservatório. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 3, p. 346-352, 2009.

PEREIRA, A.R.; SEDIYAMA, G.C.; NOVA, N.A.V. **Evapotranspiração**. Campinas: FUNDAG, 2013.

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

RODRIGUES, C.M.M. **Cálculo da evaporação de albufeiras de grande regularização do sul de Portugal**. TESE (Doutorado) – Engenharia de Recursos Hídricos, Universidade de Évora, Évora, 269f., 2009.

RONG, Y., SU, R., ZHANG, R., DUAN, Z., Effects of climate variability on evaporation in Dongping Lake, China, during 2003-2010. **Advances in Meteorology**, 2013.

ROSENBERRY, D.O.; WINTER, T.C.; BUSO, D.C.; LIKENS, G.E. Comparison of 15 evaporation methods applied to a small mountain lake in the northeastern USA. **Journal of Hydrology**, v. 340, p. 149-166, 2007.

ROSNER, B. **Fundamentals of Biostatistics**. Belmont: Duxbury Press (4th), 1995.

SENTELHAS, P. C.; CARAMORI, P. H. Inconsistências na medida da chuva com pluviômetros de balança, utilizados em estações meteorológicas automáticas. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 10, n. 2, p. 301-304, 2002.

SILVA, J.B.L da; FERREIRA, P.A.; RAMOS, M.M.; EUCLYDES, H.P.; SOARES, V.P. Modelos de previsão de enchentes em tempo real para o município de Nova Era – MG. **Recursos Hídricos e Ambientais**, p. 190-204, 2009.

SUASSUNA, JOÃO. **A pequena e média açudagem no semiárido nordestino: uso da água para produção de alimentos**. Recife: Fundação Joaquim Nabuco, 1993.

TANNY, J.; COHEN, S.; ASSOULINE, S.; LANGE, F.; GRAVA, A.; BERGER, D.; TELTCH, B.; PARLANGE, M.B. Evaporation from a small water reservoir: direct measurements and estimates. **Journal of Hydrology**, v. 351, n. 1, p. 218-229, 2008.

TUCCI, C. E. M.; BELTRAME, L. F. S. Evaporação e Evapotranspiração. In: TUCCI, C. E. M. (Org.). **Hidrologia: ciência e aplicação**. Porto Alegre: Editora da Universidade, p. 253-288, 1993.

TUCCI, Carlos E.M. (Org.). **Hidrologia. Ciências e aplicação**. Porto Alegre: Ed. da Universidade: ABRH: EDUSP, p. 943, 1993.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 3^a ed., Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2002.

TURCO, J. E. P., BARBOSA, J. C. Avaliação de duas estações meteorológicas automatizadas, para estimativa diária da evapotranspiração de referência obtida pelo método de Penman-Monteith. **Irriga**, v. 13, n. 3, p. 339-354, 2008.

VAREJÃO-SILVA, M.A. **Meteorologia e Climatologia**. Brasília: INMET, 2006.

VIEIRA, N.P.A. **Estimativa de evaporação nos reservatórios Três Marias-MG e Sobradinho-BA**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 111 f., 2015.

VILLELA, S.M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1975.

WARD, A.D.; TRIMBLE, S.W. **Environmental Hydrology**. 2nd Ed. USA: Lewis Publishers, 2004.

WMO. **International Glossary of Hydrology**, Geneva: WMO, 2012.

WMO. **Guide to meteorological instruments and methods of observation**, 2018 ed., Geneva: WMO-No. 8, 2018.

WILLMOTT, C. J.; ACKLESON, S. G.; DAVIS, R. E. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geography Research**, v. 90, n.5, p. 8995-9005, 1985.

WURBS, R. A.; AYALA, R. A. Reservoir evaporation in Texas, USA. **Journal of Hydrology**, v. 510, p. 1-9, 2014.

**ANEXO A – DADOS DE VELOCIDADE DO VENTO MEDIDOS A 10M DA
ESTAÇÃO METEOROLÓGICA CONVENCIONAL E OS VALORES
CONVERTIDOS PARA 2M.**

	Velocidade Vento (10m)			Velocidade Vento (2m)		
	9h	15h	21h	9h	15h	21h
Período de Validação das Estações Meteorológicas						
11/11/2018	3	4	4	1,9	2,3	2,3
12/11/2018	4	2,5	3	2,3	1,8	1,9
13/11/2018	3,5	4	3	2,1	2,3	1,9
14/11/2018	7,5	5	3	3,4	2,6	1,9
15/11/2018	4	4	4	2,3	2,3	2,3
16/11/2018	4,5	3	3	2,4	1,9	1,9
17/11/2018	4	4	4	2,3	2,3	2,3
18/11/2018	4	4	4	2,3	2,3	2,3
19/11/2018	6,5	5,5	2,5	3,1	2,8	1,8
20/11/2018	4,5	5	2,5	2,4	2,6	1,8
21/11/2018	3	2,5	3,5	1,9	1,8	2,1
22/11/2018	2,5	6,5	2	1,8	3,1	1,6
23/11/2018	7	4	4	3,3	2,3	2,3
24/11/2018	4	2,5	3	2,3	1,8	1,9
25/11/2018	2	4	3	1,6	2,3	1,9
26/11/2018	6,5	5	3,5	3,1	2,6	2,1
27/11/2018	4	3,5	3	2,3	2,1	1,9
28/11/2018	4	3	5	2,3	1,9	2,6
29/11/2018	3	2,5	3	1,9	1,8	1,9
30/11/2018	4,5	2	2	2,4	1,6	1,6
Período de Medições da Estação Meteorológica						
11/10/2019	3,5	4,5	3,5	2,1	2,4	2,1
12/10/2019	4	4	4	2,3	2,3	2,3
13/10/2019	4	4	3	2,3	2,3	1,9
14/10/2019	4,5	4,5	3,5	2,4	2,4	2,1
15/10/2019	5,5	3,5	4,5	2,8	2,1	2,4
16/10/2019	3	5,5	3	1,9	2,8	1,9
17/10/2019	3	4	5,5	1,9	2,3	2,8
18/10/2019	5	4,5	3	2,6	2,4	1,9
19/10/2019	4	3	3	2,3	1,9	1,9
20/10/2019	3	3	3	1,9	1,9	1,9
21/10/2019	2	3,5	3	1,6	2,1	1,9
22/10/2019	4	4	2,5	2,3	2,3	1,8
23/10/2019	3,5	3	2,5	2,1	1,9	1,8
24/10/2019	7	4	4	3,3	2,3	2,3
25/10/2019	4	4	4	2,3	2,3	2,3
26/10/2019	3	3	3	1,9	1,9	1,9

27/10/2019	4	4	3	2,3	2,3	1,9
28/10/2019	3	5,5	4,5	1,9	2,8	2,4
29/10/2019	5	5	3,5	2,6	2,6	2,1
30/10/2019	4,5	5,5	4,5	2,4	2,8	2,4
31/10/2019	2	7	4	1,6	3,3	2,3
01/11/2019	4,5	3	3	2,4	1,9	1,9
02/11/2019	4	3	3	2,3	1,9	1,9
03/11/2019	3	4	3	1,9	2,3	1,9
04/11/2019	5,5	3	3	2,8	1,9	1,9
05/11/2019	3	6,5	2,5	1,9	3,1	1,8
06/11/2019	5,5	4	5,5	2,8	2,3	2,8
07/11/2019	7,5	4	2	3,5	2,3	1,6
08/11/2019	6,5	3,5	3	3,1	2,1	1,9
09/11/2019	4	3	3	2,3	1,9	1,9
10/11/2019	4	3	3	2,3	1,9	1,9
11/11/2019	5	5	3,5	2,6	2,6	2,1
12/11/2019	5	4	4	2,6	2,3	2,3
13/11/2019	7	5	5,5	3,3	2,6	2,8
14/11/2019	2,5	5,5	6	1,8	2,8	2,9
15/11/2019	3	3,5	3	1,9	2,1	1,9
16/11/2019	4	3	4	2,3	1,9	2,3
17/11/2019	3	6	3	1,9	2,9	1,9
18/11/2019	2,5	5,5	1	1,8	2,8	1,3
19/11/2019	4	5	3	2,3	2,6	1,9
20/11/2019	4,5	6	5	2,4	2,9	2,6
21/11/2019	2,5	7	4,5	1,8	3,3	2,4
22/11/2019	5	3,3	3	2,6	2,0	1,9
23/11/2019	3	4	3	1,9	2,3	1,9
24/11/2019	3	3	4	1,9	1,9	2,3
25/11/2019	3,5	2,5	3,5	2,1	1,8	2,1
26/11/2019	2,5	3	3,5	1,8	1,9	2,1
27/11/2019	2,5	3	2,5	1,8	1,9	1,8
28/11/2019	4,5	3,5	3	2,4	2,1	1,9
29/11/2019	3,5	7,5	3,5	2,1	3,5	2,1
30/11/2019	4	3	4	2,3	1,9	2,3
01/12/2019	4	3,5	4	2,3	2,1	2,3
02/12/2019	3,5	3	3	2,1	1,9	1,9
03/12/2019	3	3	4	1,9	1,9	2,3
04/12/2019	2,5	4,5	3	1,8	2,4	1,9
05/12/2019	3	5	3	1,9	2,6	1,9
06/12/2019	2	2,5	3	1,6	1,8	1,9
07/12/2019	3	4	2,5	1,9	2,3	1,8
08/12/2019	4,5	4,5	3	2,4	2,4	1,9
09/12/2019	5	3	3,5	2,6	1,9	2,1
10/12/2019	2,5	2,5	2	1,8	1,8	1,6
11/12/2019	2	3,5	2	1,6	2,1	1,6

**ANEXO B – EVAPORAÇÃO (MM) MÉDIA DE 7 DIAS NO RESERVATÓRIO
GAVIÃO OBTIDA PELOS MODELOS DO BALANÇO HÍDRICO, DE PENMAN E
DE DIFERENÇA DE PRESSÃO.**

Período (Dias)	Balanço Hídrico - Evap. Máxima	Balanço Hídrico - Evap. Mínima	Penman - EMC campus do pici	Penman - EMA embarcada	Penman - EMA solo (400m)	Diferença de Pressão
7	3,5	2,4	11,68	7,75	7,78	8,58
8	-2,1	-1,4	11,66	7,95	7,94	8,39
9	-8,5	-5,7	11,51	7,69	7,83	8,42
10	-14,4	-9,6	10,99	7,43	7,64	7,74
11	-18,4	-12,3	10,83	7,63	7,71	7,58
12	-19,3	-12,8	10,79	7,67	7,84	7,32
13	-20,1	-13,4	11,21	7,89	7,69	6,49
14	-16,5	-11,0	11,37	7,94	7,73	6,37
15	-6,9	-4,6	11,73	7,97	7,77	7,35
16	5,5	3,7	11,72	8,12	7,91	6,66
17	15,8	10,5	12,29	8,33	8,09	7,05
18	22,6	15,1	12,41	8,34	8,25	7,28
19	22,7	15,1	12,31	8,38	8,27	7,38
20	6,8	4,6	12,15	8,26	8,50	8,06
21	-8,8	-5,9	12,20	8,34	8,67	7,84
22	-20,8	-13,9	12,03	8,34	8,74	6,98
23	-32,3	-21,5	12,09	8,25	8,63	7,68
24	-38,9	-25,9	11,87	8,14	8,59	7,85
25	-39,3	-26,2	11,85	7,97	8,49	7,58
26	-32,0	-21,3	11,95	7,77	8,33	7,06
27	-5,3	-3,5	11,98	7,71	8,37	8,36
28	19,4	13,0	12,00	7,74	8,30	8,20
29	35,8	23,9	12,21	7,83	8,41	8,70
30	47,3	31,5	12,03	7,81	8,39	8,52
31	53,4	35,6	11,95	7,72	8,41	8,28
32	56,0	37,3	12,08	7,81	8,42	7,99
33	51,3	34,2	11,93	7,89	8,52	8,45
34	41,2	27,5	11,99	7,93	8,54	7,78
35	30,6	20,4	12,05	7,81	8,57	8,06
36	22,5	15,0	11,88	7,65	8,32	7,27
37	16,9	11,3	11,90	7,61	8,25	7,05
38	13,8	9,2	12,09	7,70	8,21	6,71
39	12,0	8,0	11,86	7,69	8,15	6,60
40	11,7	7,8	11,58	7,61	7,94	6,19
41	13,7	9,1	11,06	7,05	7,41	6,08
42	19,2	12,8	10,70	7,17	7,52	5,96
43	24,3	16,2	10,85	7,14	7,63	5,89
44	29,8	19,9	10,94	7,17	7,71	5,78
45	35,7	23,8	11,01	7,19	7,82	5,77
46	40,6	27,0	11,40	7,14	7,88	5,89

47	46,2	30,8	11,64	7,18	7,92	5,73
48	51,6	34,4	12,15	7,55	8,40	5,59
49	46,8	31,2	12,58	7,42	8,37	5,40
50	41,8	27,9	12,58	7,46	8,33	5,70
51	36,1	24,1	12,61	7,52	8,34	5,82
52	29,8	19,9	12,53	7,42	8,35	6,07
53	24,3	16,2	12,49	7,51	8,37	6,07
54	19,7	13,1	12,51	7,52	8,48	6,07
55	13,6	9,1	12,48	7,60	8,50	6,33
56	13,4	8,9	12,38	7,64	8,43	6,40
57	13,6	9,1	12,34	7,69	8,62	6,63
58	14,3	9,6	12,40	7,76	8,79	6,52
59	14,6	9,7	12,43	7,86	8,78	6,61
60	15,1	10,1	12,39	7,72	8,65	6,39
61	15,5	10,4	12,38	7,73	8,61	6,50
62	15,9	10,6	11,64	7,55	8,38	6,05

ANEXO C – MEDIDAS DO SENSOR DE PRESSÃO

