



Campos dos Goytacazes/RJ

ANÁLISE DE EVAPORAÇÃO COM O USO DO SAGREH: ESTUDO DE CASO NO AÇUDE MANOEL BALBINO

Any Karoline da Silva Moura¹; Celme Torres Ferreira da Costa²; Otacílio Correia de Lima Neto³; Ana Rute Batista Pereira⁴; Rayanne Bezerra de Melo⁵; Pedro Henrique Tavares Batista⁶.

RESUMO – Uma das soluções mais aplicadas para mitigar os efeitos da escassez hídrica é a construção de reservatórios de acumulação. Para um gerenciamento adequado é necessário conhecer todas as parcelas do balanço hídrico, especialmente os volumes perdidos pela evaporação. Este trabalho objetiva utilizar a ferramenta SAGREH (Sistema de Apoio à Gestão dos Recursos Hídricos) para analisar a evaporação no reservatório Manoel Balbino, localizado na Bacia Hidrográfica do Rio Salgado, no Ceará. Realizou-se estimativas da evapotranspiração por meio dos métodos empíricos propostos por Penman-Monteith-FAO-56, Priestley-Taylor e Jensen-Haise, comparando-se com os valores da Normal Climatológica da Evaporação Total dos anos de 1981-2010. Para analisar a resposta do reservatório às estimativas, utilizou-se a ferramenta SAGREH. Observou-se que o método que retornou as simulações mais fidedignas foi o Jensen-Haise ($E_{\text{médio}}=0,45698\text{hm}^3$). A ferramenta SAGREH mostrou-se eficiente tanto para a pesquisa quanto para a gestão e operação dos reservatórios.

ABSTRACT– One of the most used solutions to decrease the water lack effects is the construction of accumulation reservoirs. In order to have an efficient management of them it is necessary to be aware about all the hydric balance parts specially the evaporated volumes. This work aims to use the SAGREH (Water Resources Management Support System) tool to analyze evaporation in the Manoel Balbino reservoir, located in the Salgado River Hydrographic Basin, in Ceará. Estimates of evapotranspiration were performed using the empirical methods proposed by Penman-Monteith-FAO-56, Priestley-Taylor and Jensen-Haise, comparing with the values of the Climatological Normal of Total Evaporation for the years 1981-2010. To analyze the response of the reservoir to the estimates, the SAGREH tool was used. It was observed that the method that returned the most reliable simulations was the Jensen-Haise ($E_{\text{average}}=0.45698\text{hm}^3$). The SAGREH tool proved to be efficient both for research and for the management and operation of the reservoirs.

Palavras-Chave – Evaporação. Simulação Balanço Hídrico. SAGREH.

1) UFCA - Av. Ten. Raimundo Rocha, 1639 - Cidade Universitária, Juazeiro do Norte - CE, (88) 3221-9200, any.moura@aluno.ufca.edu.br

2) UFCA - Av. Ten. Raimundo Rocha, 1639 - Cidade Universitária, Juazeiro do Norte - CE, (88) 3221-9200, celme.torres@ufca.edu.br

3) COGERH - R. Cícero Araripe, 25 - Pimenta, Crato - CE, (88) 3523-6302, otacilio.neto@cogerh.com.br

4) UFCA - Av. Ten. Raimundo Rocha, 1639 - Cidade Universitária, Juazeiro do Norte - CE, (88) 3221-9200, ana.pereira@aluno.ufca.edu.br

5) UFCA - Av. Ten. Raimundo Rocha, 1639 - Cidade Universitária, Juazeiro do Norte - CE, (88) 3221-9200, rayannebmel@gmail.com

6) UFCA - Av. Ten. Raimundo Rocha, 1639 - Cidade Universitária, Juazeiro do Norte - CE, (88) 3221-9200, pedro.tavares@aluno.ufca.edu.br



Campos dos Goytacazes/RJ

INTRODUÇÃO

No Ceará, a evolução das Políticas de Recursos Hídricos esteve fortemente ligada aos grandes ciclos de seca que assolaram o Estado, sendo iniciadas pelo que se nomeou de fase hidráulica, com a construção de grandes açudes. Juntamente com o aumento das demandas dos consumidores, introduziu-se a implantação dos procedimentos de planejamento e gestão dos recursos hídricos por meio do Sistema Integrado de Gestão de Recursos Hídricos (SIGERH), coordenado pela Secretaria dos Recursos Hídricos do Estado, com o objetivo de garantir o atendimento em quantidade e qualidade suficientes aos usuários atuais e futuros (SECRETARIA DOS RECURSOS HÍDRICOS DO CEARÁ, 2018).

Na tentativa de facilitar a aplicação do conhecimento técnico, em consonância com a gestão participativa e a necessidade recorrente de auxílio na operação dos reservatórios, a COGERH desenvolveu o SAGREH: uma ferramenta computacional para o desenvolvimento das simulações de esvaziamento dos reservatórios localizados no Estado. O funcionamento do sistema ocorre a partir de dados de entrada e saída facilmente compreensíveis pelos usuários e oferece indicações pertinentes para o manejo hídrico (PAULINO, 1997).

Sabe-se que a alta taxa de evaporação anual é um fator bastante representativo no estudo dos componentes do balanço hídrico. Segundo a ANA (2019), o Ceará se enquadra entre os estados com maior consumo de água por efeito de evaporação líquida (superior a 2.000 mm/ano), ocorrendo principalmente em reservatórios artificiais de grande porte para geração hidrelétrica ou para usos múltiplos, em especial para abastecimento público, e resultando na redução da disponibilidade hídrica.

Diante disto o objetivo do trabalho foi aplicar os modelos empíricos de Penman-Monteith-FAO-56, de Jensen-Haise e de Priestley-Taylor para o cálculo da evapotranspiração de referência. Na sequência, comparar as parcelas de evaporação anual obtidas por meio das simulações do SAGREH e do resultado dos modelos empíricos e a partir das simulações estimar um fator de evaporação que condicione um melhor ajuste das simulações de balanço hídrico no SAGREH no reservatório Manoel Balbino, localizado na Bacia Hidrográfica do Rio Salgado, no período de 2012 a 2020.

METODOLOGIA

Área de Estudo



Campos dos Goytacazes/RJ

A área de estudo localiza-se no Sul do estado do Ceará. Sendo uma das principais bacias hidrográficas do estado, a bacia do Salgado tem uma área de drenagem de 12.865 km², abrangendo 23 municípios e possui mais de 650 açudes cadastrados. Dentre esses, destacam-se os 15 açudes que são monitorados pela COGERH: Atalho, Cachoeira, Gomes, Jenipapeiro II, Junco, Lima Campos, Manoel Balbino, Olho D'água, Prazeres, Quixabinha, Rosário, São Domingos II, Tatajuba, Thomaz Osterne e Ubaldinho (COGERH, 2022).

O reservatório Manoel Balbino, conhecido por Açude dos Carneiros, está situado no riacho dos Carás, afluente da margem esquerda do rio Batateiras, localizado nos municípios de Juazeiro do Norte e Caririçu. Sua construção ocorreu em 1985 pelo DNOCS entre a latitude 7° 10' 72" S e longitude 39° 32' 93" W, possui uma capacidade máxima de 37,18 hm³, controlando uma bacia hidrográfica de 41,32 km² e uma vazão alocada de 0,033 m³/s ou 33 L/s (COGERH, 2020).

De acordo com o último Inventário Ambiental do Açude Manoel Balbino (IVA), este tem como demandas a dessedentação animal, os usos domésticos, a irrigação, a pesca artesanal e a piscicultura intensiva, abastecendo a cidade de Caririçu, além das localidades São Paulo, Sítio Cidade e Sítio Umburana (COGERH, 2017).

Modelos empíricos de evapotranspiração

Para o cálculo da evapotranspiração de referência foram utilizadas as equações de Penman-Monteith-FAO56 (Equação 1), Jensen-Haise (Equação 2) e Priestley-Taylor (Equação 3). De acordo com Pereira (2019), essas equações apresentaram um desempenho satisfatório para a Mesorregião Sul Cearense.

$$ET_0 = \frac{0,408 \Delta (R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma (1 + 0,34 U_2)} \quad (1)$$

Sendo: ET_0 é a evapotranspiração de referência (mm.dia-1); R_n é o saldo de radiação (MJ.m-2.dia-1); G é a densidade de fluxo de calor sensível no solo (MJ.m-2.dia-1); T é a temperatura média do ar (°C); U_2 é a velocidade do vento medido a 2,0 m de altura (m.s-1); e_s é a pressão de saturação de vapor (kPa); e_a é a pressão parcial de vapor (kPa); $(e_s - e_a)$ é o déficit de pressão de vapor d'água (kPa); Δ é a declividade da curva de pressão de saturação de vapor (kPa.°C-1); γ é o coeficiente psicrométrico (kPa.°C-1).



Campos dos Goytacazes/RJ

$$ET_o = R_s (0,025 T + 0,08) \quad (2)$$

Em que: ET_o a evapotranspiração de referência (mm.dia-1); T a temperatura média diária ($^{\circ}C$); R_s a radiação solar global (mm.dia-1).

$$ET_o = \frac{\alpha W (R_n - G)}{\lambda} \quad (3)$$

Sendo: ET_o a evapotranspiração de referência (mm.dia-1); R_n o saldo de radiação (MJ.m-2.dia-1); G o fluxo de calor no solo (MJ.m-2.dia-1); λ o calor latente de evaporação (2,45 MJ.kg-1); W o fator de ponderação.

Os dados meteorológicos utilizados são referentes às normais climatológicas de 1981-2010, disponíveis no banco de dados do INMET (2021), referentes à Estação Meteorológica da cidade de Barbalha, código 82784. Para a obtenção da média mensal da radiação solar da região, foi utilizada a tabela da climatologia mensal da radiação solar (W/m^2) do Atlas Solarimétrico do Ceará, para a cidade de Caririáçu.

Para simulação de esvaziamento dos reservatórios utilizou-se o conjunto de planilhas do suplemento SAGREH versão 10.021 – Sistema de Apoio ao Gerenciamento dos Recursos hídricos. Esse programa constituído por diversas planilhas foi desenvolvido por Técnicos da Companhia de Gestão de Recursos Hídricos do Ceará (COGERH) com intuito de prever o comportamento de esvaziamento, onde são definidos cenários que orientarão a negociação da alocação de água. A simulação de esvaziamento é realizada tomando como base o balanço hídrico de entradas e saídas ao reservatório durante períodos sucessivos, conforme Equação 4:

$$V_{final} = V_{inicial} - V_{liberada} * (Data_{final} - Data_{inicial}) - V_{evaporado} + V_{aporte} \quad (4)$$

Em que: $V_{inicial}$ é o volume inicial do reservatório (hm^3); $V_{liberada}$ é o volume liberado em 24 horas (hm^3); $Data_{final}$ é a data final da simulação (dias); $Data_{inicial}$ é a data inicial da simulação (dias); $V_{evaporado}$ é o volume evaporado (hm^3); V_{aporte} é o volume de aporte (hm^3).

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados apresentados na Figura 1 mostram o comportamento dos volumes aportados e perdidos no período de 2012 a 2020. Percebe-se que no ano de 2016, as grandes saídas computadas no balanço hídrico, em consonância com as pequenas recargas, contribuíram bastante para a diminuição do volume armazenado. No ano de 2012, o volume perdido pelo reservatório foi aproximadamente três vezes o volume de aporte, alcançando um déficit hídrico de cerca de 5,80 hm³, que resultou no rebaixamento de 3,17 m no nível do reservatório. A partir de 2017, a proporção entre entradas e saídas passou a valores mais próximos da equivalência, caracterizando um saldo positivo no armazenamento somente nos anos de 2018 e 2020. Entretanto no de 2018, que representou a melhor recarga da série, o aumento do nível foi de apenas 2,03m.

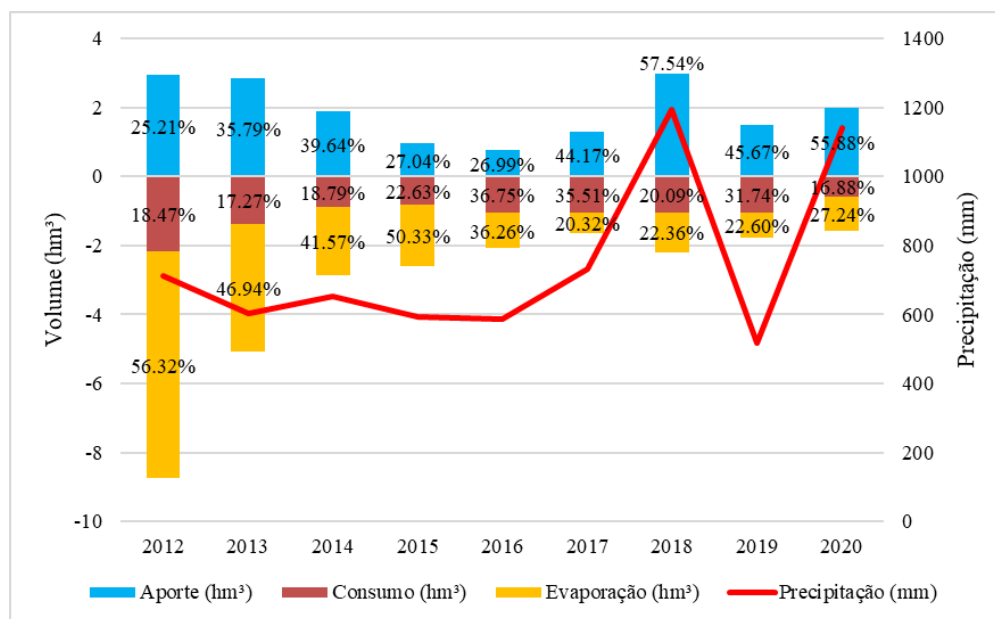


Figura 1 – Parcelas do balanço hídrico (hm³) e sua representatividade (%) ao longo do período. Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Observando as porcentagens que cada parcela do balanço hídrico representa é possível verificar que, dentre os volumes movimentados ao longo dos anos, a evaporação representa uma parcela bastante significativa nas saídas, de pelo menos 20,32%, sendo muitas vezes superior ao consumo.

Foram aplicadas as equações Penman-Monteith-FAO56 (Equação 1), Jensen-Haise (Equação 2) e Priestley-Taylor (Equação 3) para simulação da evaporação no reservatório e o método padrão do SAGREH, que utiliza os valores médios da normal climatológica de 1981-2010. Os resultados do comportamento da evaporação mensal e anual das simulações são apresentados na Tabela 1.



Campos dos Goytacazes/RJ

Comparando-se os valores médios observados (SAGREH) e calculados (Penman-Monteith-FAO56, Priestley-Taylor e Jensen-Haise), é possível perceber que o método de Jensen-Haise possui uma distribuição dos dados mais uniforme em comparação à distribuição dos dados observados.

Tabela 1 – Lâmina média evaporada (mm) ao longo do ano, de acordo com os métodos SAGREH, FAO, Priestley-Taylor e Jensen-Haise

Mês	SAGREH	FAO	Priestley-Taylor	Jensen-Haise
Jan	137.80	138.36	148.75	170.96
Fev	100.90	117.16	134.20	165.97
Mar	89.70	123.97	146.00	163.13
Abr	87.70	119.26	137.90	163.03
Mai	122.40	124.02	132.85	158.52
Jun	171.30	126.22	116.67	150.68
Jul	209.20	146.32	123.83	157.25
Ago	265.20	171.38	139.78	179.38
Set	289.60	191.08	152.38	204.90
Out	291.00	196.57	170.13	218.91
Nov	254.60	176.94	160.29	207.36
Dez	225.00	166.20	155.57	189.63
Anual	2244.40	1797.47	1718.35	2129.73
Desvio padrão	75.03	27.98	14.72	21.58

Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Além disso, percebe-se que a metodologia que implicou as maiores perdas por evaporação foi o SAGREH, seguida por Jensen-Haise, Penman-Monteith-FAO56 e Priestley-Taylor. Conforme apontado por Santana et al. (2019), o método de Jensen-Haise se adequa melhor para regiões áridas e semiáridas, corroborando o bom desempenho obtido pelo método na região estudada.

Já os modelos de Priestley-Taylor e Penman-Monteith-FAO-56 apresentaram valores absolutos de lâmina anual inferiores dos valores do SAGREH (Normais Climatológicas). Logo, a utilização destes modelos para a realização do balanço hídrico a nível anual poderá acarretar uma subestimação da evaporação, podendo comprometer a segurança hídrica. Lima (2022) estudando dados climáticos na bacia hidrográfica do rio Piancó-Piranhas-Açu, localizada nos estados da Paraíba e do Rio Grande do Norte, constatou que o modelo de Priestley-Taylor apresentou o melhor desempenho, em relação



Campos dos Goytacazes/RJ

ao método de Penman-Monteith, apresentando tendência de superestimar os valores de ETo, de forma a corroborar com a situação da região aqui.

A análise de variância foi aplicada para verificar se existe diferença significativa entre os resultados dos métodos. Optou-se pelo método não-paramétrico pois os pressupostos para aplicação de uma Análise de Variância Simples não foram atendidos. O teste não-paramétrico de Kruskal-Wallis retornou um p-value igual a 0.05025. Considerando um nível de significância $p < 0.05$, não é possível rejeitar a hipótese nula. Sendo assim, com base nesse teste, não se pode afirmar que houve diferença entre os métodos testados.

A Figura 2 apresenta a resposta do reservatório aos métodos com o valor observado através do monitoramento, ao final de cada ano.

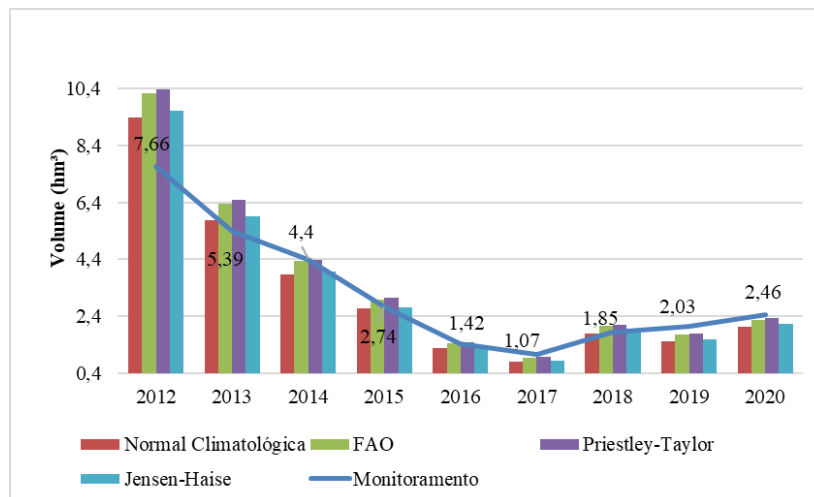


Figura 2 – Comparação do volume residual estimado pelos métodos com o volume observado. Fonte: Elaborado pela autora (2021).

Considerando que o valor ideal seria o fator de evaporação igual a 1, ou seja, onde a evapotranspiração estimada/simulada fosse igual a real, através da análise da Tabela 2 é possível concluir que, sem fazer calibrações nas taxas de evaporação, o método que obteve o melhor desempenho, por gerar menor erro médio em comparação ao valor monitorado, foi o Método de Jensen-Haise, seguido pelo SAGREH que utiliza a Normal Climatológica.

Tabela 2– Erro entre as estimativas das diferentes metodologias e o monitoramento

Ano	Monitorado		SAGREH		FAO		Priestley-Taylor		Jensen-Haise	
	Vol. (hm³)		Vol. (hm³)	E _{absoluto} (hm³)	Vol. (hm³)	E _{absoluto} (hm³)	Vol. (hm³)	E _{absoluto} (hm³)	Vol. (hm³)	E _{absoluto} (hm³)
2012	7.66		9.39	1.7321	10.23	2.5740	10.39	2.7320	9.62	1.9610
2013	5.39		5.78	0.3891	6.37	0.9810	6.49	1.0978	5.92	0.5251



Campos dos Goytacazes/RJ

2014	4.4	3.87	0.5262	4.33	0.0716	4.38	0.0245	3.97	0.4282
2015	2.74	2.66	0.0771	2.97	0.2329	3.03	0.2942	2.72	0.0179
2016	1.42	1.26	0.1557	1.46	0.0369	1.48	0.0635	1.30	0.1176
2017	1.07	0.81	0.2574	0.95	0.1216	0.97	0.1015	0.84	0.2263
2018	1.85	1.80	0.0534	2.04	0.1941	2.11	0.2580	1.90	0.0546
2019	2.03	1.51	0.5182	1.74	0.2899	1.78	0.2495	1.58	0.4454
2020	2.46	2.01	0.4456	2.28	0.1813	2.33	0.1258	2.12	0.3368
E_m (hm³)	---		0.46165		0.52037		0.54966		0.45698

Fonte: Elaborado pela autora (2021)

De acordo com de Sousa Freitas (2019), o semiárido apresenta-se como desafiador no que diz respeito à modelagem hidrológica para a ciência da disponibilidade hídrica, perpassando finalidades relacionadas à autorização do uso da água até a operacionalização dos corpos hídricos de usos múltiplos. Dessa forma, é de grande valia os modelos de previsão cada vez mais refinados como ferramenta da gestão integrada dos reservatórios.

Logo, existe uma problemática, do ponto de vista da segurança hídrica, nos anos e modelos em que há uma subestimação das perdas, resultando em volumes acumulados reais menores que os estimados, sendo esta situação comprometedoras do nível de garantia do atendimento.

De modo a obter um melhor ajuste da simulação, através de calibração, em virtude das dificuldades de determinar com exatidão a evaporação local, o SAGREH oferece a possibilidade da alteração do Fator de Evaporação das simulações. Na Figura 3, é possível observar que houve grande variação dos Fatores de Evaporação ao longo dos anos, tornando difícil a estimativa de um fator ótimo (ou ideal) para todo o intervalo de tempo.

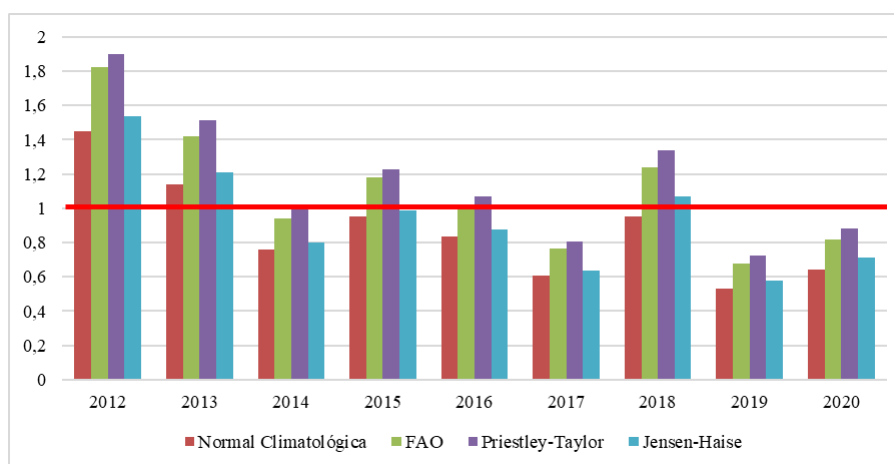


Figura 3 - Comparação do fator de evaporação calibrado para os diferentes métodos.

Fonte: Elaborada pela autora (2021).



Campos dos Goytacazes/RJ

O método do SAGREH (Normal Climatológica) implicou em um fator de evaporação médio de 0,875, associado a um desvio-padrão de 0,27; o método de Penman-Monteith-FAO-56 teve um fator de evaporação médio de 1,10, associado a um desvio padrão de 0,34; o método de Priestley-Taylor foi de 1,16 e o desvio padrão foi de 0,36 e o método de Jensen-Haise foi de 0,83 ligado a um desvio padrão de 0,13. A partir do menor desvio padrão, pode-se afirmar que o método de Jensen-Haise é o método que melhor se adapta a adoção de um fator de evaporação ótimo de 0,83 para o reservatório no período de 2012 a 2020.

CONCLUSÃO

O estudo dos componentes que constituem o balanço hídrico dos reservatórios é de grande relevância na determinação de formas sustentáveis de utilização deste recurso. A partir da coleta de dados foi possível a implementação dos procedimentos empíricos para o cálculo da evapotranspiração de referência e estimativa da evaporação no reservatório. Apesar disto, é possível apontar uma grande deficiência no monitoramento da evaporação e até mesmo de parâmetros que poderiam levar ao seu cálculo indireto, como o acompanhamento diário da radiação solar. Portanto foram consideradas algumas condições de contorno, como por exemplo a utilização de dados da estação meteorológica da cidade de Barbalha, enquanto o reservatório está situado entre as cidades de Caririaçu e Juazeiro do Norte. Além disto, as falhas das séries de dados meteorológicos e do nível diário dos reservatórios contribuem para o aumento das incertezas por trás dos resultados obtidos.

Do ponto de vista da gestão e operação a ferramenta SAGREH se mostrou eficiente tanto para a pesquisa quanto para o procedimento de gestão e operação dos reservatórios, pois permitiu a realização dos vários cenários propostos com grande agilidade e fácil manuseio. Todavia, devido às limitações impostas pela escassez de dados, especialmente dos referentes à evaporação, recomenda-se que sejam estudadas outras metodologias de cálculo de evaporação aplicadas ao balanço hídrico do reservatório, de modo que na ausência de medições diretas, estes métodos indiretos possam ser aplicados. Por fim, ressalta-se o anseio pelo monitoramento regular dos parâmetros meteorológicos que viabilizem a reprodução deste estudo com séries históricas mais longas, possibilitando assim, uma caracterização mais definida do desempenho dos reservatórios ao longo do tempo.



Campos dos Goytacazes/RJ

REFERÊNCIAS

- BRASIL, Agência Nacional de Águas. (2019). *“Manual de Usos Consuntivos da Água no Brasil”*. Brasília: Agência Nacional de Águas.
- CEARÁ. Secretaria dos Recursos Hídricos. (2018). *“Plano de Ações Estratégicas de Recursos Hídricos do Ceará”*. Ceará: Secretaria dos Recursos Hídricos.
- COMPANHIA DE GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS. (2020). *“Matriz dos usos múltiplos”*. Ceará: Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos.
- COMPANHIA DE GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS. (2017). *“Inventários ambientais de açudes da Sub-bacia do Salgado - Açude Manoel Balbino”*. Ceará: Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos.
- COMPANHIA DE GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS. (2022). Institucional. Disponível em: <<https://portal.cogerh.com.br/institucional-cogerh/>>. Acesso em: 23 de mai. de 2022.
- DE SOUSA FREITAS, Marcos Airton. (2019). *“Gestão e modelagem hídrica em bacia hidrográfica do semiárido brasileiro”*. Brazilian Journal of Development, v. 5, n. 7, p. 8344-8351.
- INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. (2018). *“Normais climatológicas do Brasil”*. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/normais>. Acesso em 10 de maio de 2021.
- LIMA, I.P.C. (2022). *“Avaliação dos processos hidrológicos em uma bacia do semiárido com o modelo SWAT calibrado com evapotranspiração por satélite”*. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, PB.
- PAULINO, W.D. (1997). *“Simulação de esvaziamento de reservatórios empregando o Microsoft Excel”*. 1. ed. Fortaleza: COGERH.
- PEREIRA, P.A.A. (2019). *“Avaliação da evapotranspiração de referência aplicando métodos empíricos na região do Cariri – CE”*. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Cariri. Juazeiro do Norte, CE.
- SANTANA, J.S; LIMA, E.F; FERNANDES, M.C; FONSECA, B.L.A.S. *“Desempenho de equações agrometeorológicas para as estações seca e chuvosa para a cidade de balsas/MA”*. Enciclopédia Biosfera - Goiânia, v.16 n.29; pp. 605. 2019.