

Scientific Electronic Archives

Issue ID: Sci. Elec. Arch. Vol. 13 (12)

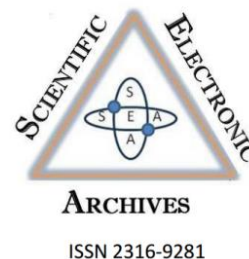
December 2020

DOI: <http://dx.doi.org/10.36560/131220201144>

Article link

<http://sea.ufr.edu.br/index.php?journal=SEA&page=article&op=view&path%5B%5D=1144&path%5B%5D=pdf>

Included in DOAJ, AGRIS, Latindex, Journal TOCs, CORE, Discoursio Open Science, Science Gate, GFAR, CIARDRING, Academic Journals Database and NTHRYS Technologies, Portal de Periódicos CAPES, CrossRef, ICI Journals Master List.



Comparação entre modelos de estimativa de evapotranspiração para Macapá, Amapá

Comparison between evapotranspiration estimation models for Macapá, Amapá

G. S. Picanço¹, O. S. Nascimento¹, W. C. M. Silva¹, O. B. Q. O. Filho¹

¹ Universidade do Estado do Amapá

* Author for correspondence: william.silva@ueap.edu.br

Resumo. O objetivo do estudo foi avaliar modelos de estimativa da evapotranspiração (ET), para o município de Macapá, AP. Os modelos estudados foram Hargreaves-Samani (HS), Turc, Camargo (CM), Jensen-Haise (JH) e Radiação Solar (RS). A ET estimada pelos modelos foram comparadas com as obtidas pelo método padrão de Penman-Monteith. Foram realizados testes estatísticos de índice de Concordância de Willmot (d), Coeficiente de Correlação (r), Coeficiente de desempenho (c), Erro Absoluto Médio (EAM), Erro Quadrático Médio e Coeficiente de Massa Residual (CMR). Com os resultados de "c" apenas HS, em agosto (c=0,71; "bom") e dezembro (c=0,73; "bom") apresentou desempenho considerado bom. Já JH teve o de pior resultado, entre 0,05 e 0,22, considerado péssimo. Em relação a "d", HS também obteve melhor resultado, com 0,79 e 0,83 em agosto e dezembro. O pior foi JH, com valor mínimo de 0,09 para maio. Para o CMR, CM, JH e RS superestimaram a ET. Já TC, apresentou tanto subestimativa, como superestimativa. HS superestimou de janeiro a julho e subestimou nos demais meses. Para EAM ocorreu tendência dos modelos em superestimar ET. Para MSE, HS apresentou os menores valores. Já JH foi o que apresentou os piores resultados, acima de 4. E o coeficiente de determinação apresentou pequena dispersão dos dados, com R² acima de 0,90 para HS, TC, JH e RS. Com base no que foi exposto, HS foi o método que apresentou as melhores respostas, sendo seguido por TC e RS. E JH foi o que apresentou a maior taxa de superestimação.

Palavras-chaves clima, desempenho, índices estatísticos.

Abstract. The aim of the study was to evaluate evapotranspiration (ET) estimation models for the municipality of Macapá, AP. The models studied were Hargreaves-Samani (HS), Turc, Camargo (CM), Jensen-Haise (JH) and Solar Radiation (RS). The ET estimated by the models were compared with those obtained by the standard Penman-Monteith method. Statistical tests of Willmot's Concordance index (d), Correlation Coefficient (r), Performance coefficient (c), Mean Absolute Error (EAM), Mean Square Error and Residual Mass Coefficient (CMR) were performed. With the results of "c" only HS, in August (c = 0.71; "good") and December (c = 0.73; "good") presented a performance considered good. JH had the worst result, between 0.05 and 0.22, considered terrible. In relation to "d", HS also had a better result, with 0.79 and 0.83 in August and December. The worst was JH, with a minimum value of 0.09 for May. For CMR, CM, JH and RS overestimated ET. TC, on the other hand, presented both underestimation and overestimation. HS overestimated from January to July and underestimated in the other months. For EAM, the models tended to overestimate ET. For MSE, HS presented the lowest values. JH was the one with the worst results, above 4. And the coefficient of determination showed a small dispersion of data, with R² above 0.90 for HS, TC, JH and RS. Based on what was exposed, HS was the method that presented the best responses, followed by CT and RS. And JH was the one with the highest overestimation rate.

Keywords: climate, performance, statistical indices.

Introdução

A evapotranspiração (ET), pela sua complexidade, se torna uma das variáveis mais atuantes no ciclo hidrológico, nela se materializa uma entrada positiva de água no sistema atmosférico,

sendo em ecossistemas agrícolas, a componente de maior relevância (Carvalho et. al., 2015).

Pereira et al. (2013) mostram que a ET é a soma de dois processos, a evaporação e a transpiração. Ambos os processos ocorrem em

superfícies vegetadas, sendo que transpiração é a evaporação da água que foi utilizada em processos metabólicos das plantas, e a evaporação é o fenômeno pelo qual uma substância passa do estado líquido para o estado gasoso e pode ocorrer tanto em massa contínua de água como em uma superfície úmida.

A estimativa do processo evapotranspirativo é de fundamental importância para diversas atividades, tais como planejamento e manejo de irrigação, planejamento de uso e outorga de recursos hídricos, sendo aplicado ainda em estudos meteorológicos, climatológicos e hidrológicos (Carvalho, et al., 2011).

O processo evapotranspirativo é afetado por diversos elementos meteorológicos, tais como: radiação solar, temperatura, déficit de pressão de vapor (DPV) e velocidade do vento. Esta influência dos mais variados elementos do clima, fez com que fossem desenvolvidos diversos métodos para a obtenção da ET classificados entre os que têm base física e teórica, mas que requerem vários parâmetros que não estão sempre disponíveis para uso, como o método de Penman-Monteith, enquanto que os métodos mais simples exigem apenas a temperatura do ar, como o método de Holdridge, e adicionalmente, a latitude do lugar, como Hargreaves e Samani (Pereira et al., 2013).

Após a publicação do Boletim FAO 56 da Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO), o método de Penman-Monteith para a estimativa de ET tornou-se o mais recomendado, pois compreende um embasamento mais físico em suas respostas (Alencar et al., 2015). E segundo Sanches et al. (2015) é o método que estima o resultado mais satisfatório quando comparado com os resultados encontrados por instrumentos.

Nesse contexto, este trabalho teve como objetivo aplicar e avaliar métodos de estimativa de ET, para Macapá-AP. Além de determinar, estatisticamente, entre os métodos de ET estudados qual apresenta melhor desempenho e com maior precisão as características da ET de Macapá, quando comparado ao método de Penman-Monteith (PM).

Métodos

Foram utilizados dados climáticos diários de temperatura do ar máxima e mínima, insolação, umidade relativa, velocidade do vento e pluviometria obtidos na estação meteorológica (nº 82098) de Macapá - AP (-0.05; -51.11; 14.46 m), disponibilizados pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). A estimativa da radiação solar foi obtida a partir de Belúcio et al. (2014). Os dados compõem uma série histórica de 30 anos (01/01/1986 até 31/12/2015).

Para simulação da ET utilizou-se o software Vensim - Personal Learning Edition (VENTANA SYSTEMS, 2020) que fornece uma maneira simples e flexível de construir modelos de simulação, permitindo projetar o comportamento da ET.

A ET foi determinada por 6 métodos: Penman-Monteith (PM), Hargreaves-Samani (HS), Turc (TC), Camargo (CM), Jansen-Haise (JH), e Radiação Solar (RS).

Os modelos de PM (Alencar et al., 2015), HS (Palaretti et al., 2014), TC (Carvalho et al., 2015), CM (Ide, 2016), JH (Ide, 2016) e RS (Ide, 2016) são representados nas equações 1, 2, 3, 4, 5 e 6, respectivamente:

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta(Rn-G) + \gamma \frac{900U_2(e_s - e_a)}{T_{med} + 273}}{\Delta + \gamma(1 + 0,34U_2)} \quad \text{Equação 1}$$

$$ET_0 = 0,0023 RA (T_{max} - T_{min})^{0,5} (17,8 + T_{med}) \quad \text{Equação 2}$$

$$ET_0 = at + 0,013 \frac{T_{med}}{T_{med} + 15} (23,88 Rs + 50) \quad \text{Equação 3}$$

$$ET_0 = RA \cdot T \cdot K_f \cdot ND \quad \text{Equação 4}$$

$$ET_0 = Rs(0,252 \cdot T_{med} + 0,078) \quad \text{Equação 5}$$

$$ET_0 = cv \cdot W \cdot Rs \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

ET₀ = evapotranspiração de Referência (mm/d);

Rn = saldo de radiação (MJ/m²);

G = fluxo de calor sensível no solo (MJ/m²);

γ = constante psicrométrica;

T_{med} = temperatura média diária do ar (°C);

U₂ = velocidade do vento a 2 metros (m/s);

e_s = pressão de vapor de saturação (kPa);

e_a = pressão de vapor d'água (kPa);

Δ = declividade da curva de pressão de vapor de saturação (kPa/°C);

T_{max} = temperatura máxima do ar;

T_{min} = temperatura mínima do ar;

RA = radiação solar extraterrestre (mm/d);

at = coeficiente baseado na umidade relativa (at=1, quando UR for maior que 50%);

Rs = radiação solar global (MJ/m²);

ND = número de eventos;

K_f = fator de ajuste determinado de acordo a temperatura média anual;

cv = fator de ajuste que varia em função da velocidade do vento e umidade relativa;

W = fator de ponderação.

O fator de ajuste K_f, em CM, foi determinado de acordo com Ide (2016), Tabela 1.

Tabela 1 –Determinação do Coeficiente de Ajuste.

Tmed	Kf
<23,5	0,01
23,6 a 24,5	0,0105
24,6 a 25,5	0,011
25,6 a 26,5	0,0115
26,6 a 27,5	0,012
>27,5	0,013

Fonte: Adaptado de Ide, 2016.

O fator de ponderação W em RS foi determinado de acordo com a equação (7):

$$W = 0,483 + 0,01 \cdot T_{med} \quad \text{Equação 7}$$

O coeficiente de Ajuste (cv) foi determinado de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2- Coeficiente de Ajuste para o método RS.

Intervalo de Velocidade Média do Vento (m/s)	Intervalo de Umidade Relativa média (%)			
	<40	40-55	55-70	>70
0-2	0,971	0,92	0,857	0,814
2-5	1,057	1,014	0,927	0,886
5-8	1,143	1,100	0,986	0,923
>8	1,229	1,172	1,043	1

Fonte: Pereira (2013).

A ET estimada pelos modelos propostos foram analisadas por meio de métodos estatísticos, tendo como modelo padrão os dados estimados por PM.

A exatidão dos modelos foi determinada por meio do índice de concordância (d) de Willmott (Alencar, 2015):

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1} (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1} (|P_i - O_i| + |O_i - O|)^2} \right] \quad \text{Equação 8}$$

Em que:

O_i = valores estimados pelo método padrão (PM);

P_i = valores estimados pelos métodos propostos;

O = média dos valores obtidos por PM.

O índice de desempenho (c) foi estimado de acordo com Andrade et al. (2016), onde "c" é o produto do índice de concordância (d) pelo coeficiente de correlação de Pearson (r).

$$c = r \cdot d \quad \text{Equação 9}$$

Os valores dos índices de desempenho e correlação, de acordo com Andrade et al. (2016), podem ser evidenciados nas Tabelas 3 e 4, respectivamente.

Tabela 3 - Avaliação do Índice de desempenho "c".

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

Fonte: Andrade et al. (2016).

Tabela 4 – Avaliação de Coeficiente de Correlação "r".

R	Classificação
0,0 a 0,1	Muito baixa
0,1 a 0,3	Baixa
0,3 a 0,5	Moderada
0,5 a 0,7	Alta
0,7 a 0,9	Muito alta
0,9 a 1,0	Quase perfeita

Fonte: Andrade et al. (2016).

Para quantificar as medidas de erros utilizou-se, segundo Almeida e Hermenegidio (2013), os seguintes parâmetros: Erro Absoluto Médio (EAM), Erro Quadrático Médio (MSE) e o Coeficiente de Massa Residual (CMR) representados nas equações, 10, 11 e 12.

$$EAM = \frac{\sum (O_i - P_i)}{N} \quad \text{Equação 10}$$

$$MSE = \frac{\sum_{n=1} (P_i - O_i)^2}{N} \quad \text{Equação 11}$$

$$CMR = \frac{\sum O_i + \sum P_i}{\sum O_i} \quad \text{Equação 12}$$

Em que:

O_i = valores estimados pelo modelo padrão (PM);

P_i = valores de ETo estimado pelos métodos propostos;

N = número de eventos realizados (365).

Para determinação da acurácia entre os métodos estimados e PM também se utilizou dos termos da equação da reta, descrita por $y = ax + b$, onde 'a' é o coeficiente angular e 'b' o coeficiente linear. O modelo para apresentar um melhor ajuste deve ter um coeficiente angular igual ou próximo a um e o linear igual ou próximo a zero.

Resultados e discussão

Pode-se observar na Figura 1 os valores médios mensais da ET para Macapá calculados pelos métodos de PM, HS, TC, CM, JH e RS.

Os maiores valores de ET, obtidos por PM, foram encontrados entre os meses de agosto e dezembro, com valores acima de 4,0 mm/dia, enquanto os menores valores foram de janeiro a julho, entre 3,0 e de 4,0 mm/dia. PM apresentou o maior valor médio de ET em outubro, com 5,22 mm/dia, enquanto fevereiro, março e abril, apresentaram os menores valores, 3,11 mm/dia. Segundo Belúcio et al. (2014), o período entre agosto e dezembro apresenta maiores valores de insolação e menores de precipitação o que aumenta a ET, enquanto o mês de março tem menores valores de insolação, devido ao posicionamento da banda de nebulosidade da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) que diminui a atuação da radiação solar incidente na região tropical, e conseqüentemente afeta a ET na região. E

segundo Tavares (2014), os meses de março, abril e maio são os mais chuvosos do ano para Macapá, o que também afeta a ET.

Moura et al. (2013) observou em seus estudos uma correlação negativa entre os valores de ET, umidade relativa e precipitação, e uma correlação positiva com insolação e radiação solar, o que concorda com os dados observados na Figura 1, ou seja, todos os modelos estimaram maiores valores para o período compreendido entre os meses de agosto e

dezembro, enquanto menores valores foram estimados para período de janeiro a junho.

Também pode ser observado na figura 1 que o método JH apresentou a maior estimativa média de ET, com média de 5,94 mm/dia. Já HS apresentou a menor estimativa média de ET, cerca de 4,21 mm/dia. Enquanto o método padrão PM estimou valor médio de 4,01 mm/dia.

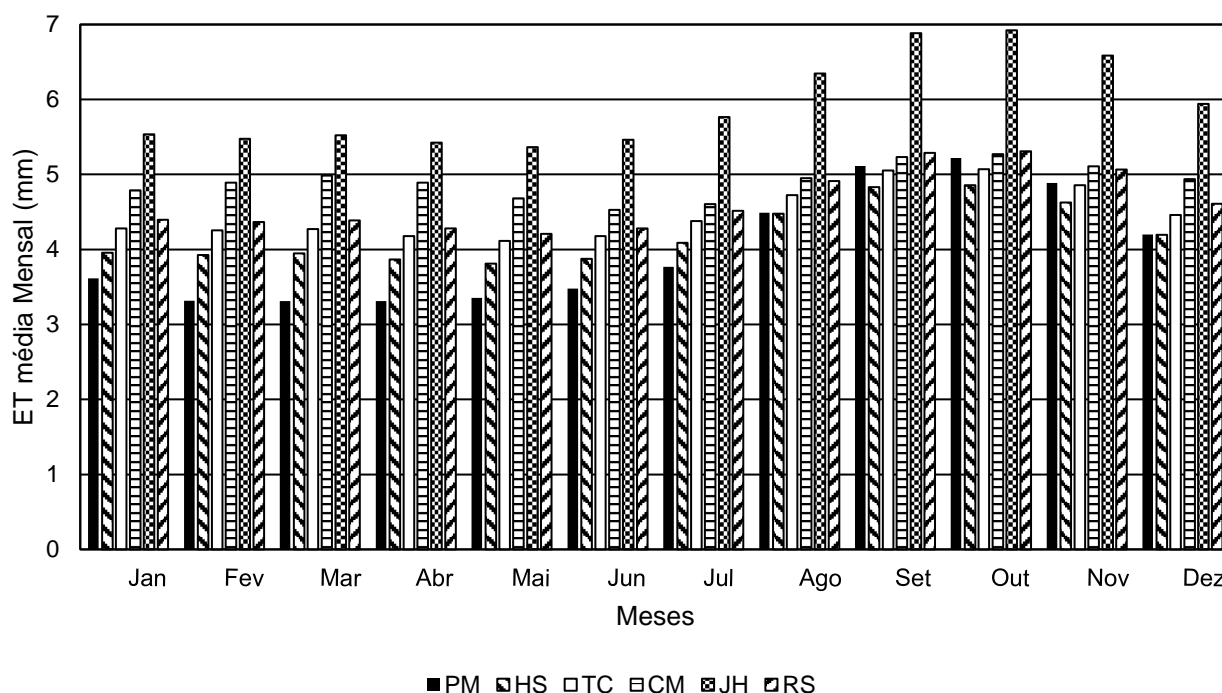


Figura 1. Valores Médios Mensais de ET (mm), para Penman-Monteith (PM), Hargreaves-Samani (HS), Turc (TC), Camargo (CM), Jensen-Haise (JH) e Radiação Solar (RS).

Já na Tabela 5 são apresentados os resultados de exatidão e de erros estatísticos da ET obtida por HS, TC, CM, JH e RS em relação a ET de PM. Com a análise mensal de “c”, nota-se que apenas HS, em agosto ($c=0,71$; “bom”) e dezembro ($c=0,73$; “bom”) apresentou desempenho considerado bom. Para os demais métodos e meses ocorreu desempenho de mediano a péssimo. O pior valor de “c” foi encontrado em maio ($c=0,003$, “péssimo”) para CM.

Silva et al. (2011), ao comparar métodos de ET para cidade de Uberlândia - MG, encontrou que HS tem um desempenho “bom”, e ao mesmo tempo superestima os valores de ET. E em estudo desenvolvido por Lima Junior et al. (2016) para o estado do Ceará, o método de HS também apresentou superestimativa dos dados de ET, apenas nos primeiros meses do ano, sendo necessário calibração dos coeficientes da equação para a obtenção de melhores resultados.

Segundo Fernandes et al. (2010) HS não é recomendado para regiões de clima úmido. E o período de julho a dezembro, em Macapá, apresenta os menores valores de precipitação e os maiores valores de insolação, como observado por Tavares

(2014). E de acordo com Palaretti et al. (2014), em estudo sobre calibração de métodos de ET, o modelo HS está fortemente relacionado com a amplitude térmica, ou seja, com a incidência de radiação solar.

HS foi desenvolvido para Califórnia, região com baixa amplitude térmica e altos valores de temperatura média. A semelhança entre o clima de Macapá e o região para onde o modelo foi desenvolvido justifica sua eficiência, principalmente entre julho e dezembro que apresenta uma ausência de precipitação, baixa umidade e alta insolação.

As análises mensais de RS não mostraram resultado satisfatório. O mais significativo foi no mês de dezembro (0,52), que apresentou desempenho sofrível, enquanto o pior foi no mês de maio (0,11), que apresentou um resultado péssimo. Os meses de julho a dezembro tiveram desempenhos considerados “mau”, “péssimo” ou “sofrível”.

O método RS, é uma adaptação do modelo de Makkink, desenvolvido para Holanda (Fernandes et al., 2010). Desta forma a radiação é a principal variável de entrada em RS, entretanto como os dados de radiação também são estimados pelo método de insolação (Angstrom-Prescott), pode-se esperar que neles estejam contidos erros de

estimativas. Uma vez que o método RS é mais sensível a essa variável ele tende a potencializar esses erros de estimativa, o mesmo não acontece no método de PM, devido ao grande número de variáveis que o modelo necessita para ser aplicado.

Entre os métodos que utilizam radiação solar como variável de entrada (JH e RS), o que

apresentou o melhor resultado de desempenho foi o método de RS. O melhor desempenho no modelo RS, pode ser explicado pela utilização do fator de ponderação que utiliza a temperatura média. Esse fator contextualiza melhor os resultados do modelo dentro das características climáticas da região.

Tabela 5 - Índices de desempenho e Erros Estatísticos

		JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
d	HS	0,42	0,29	0,36	0,32	0,31	0,39	0,56	0,79	0,45	0,37	0,54	0,83
	TC	0,27	0,21	0,26	0,22	0,21	0,26	0,38	0,63	0,71	0,57	0,79	0,67
	CM	0,17	0,13	0,16	0,13	0,12	0,17	0,29	0,51	0,62	0,6	0,52	0,42
	JH	0,11	0,1	0,13	0,1	0,09	0,1	0,15	0,19	0,1	0,1	0,13	0,25
	RS	0,24	0,19	0,24	0,21	0,19	0,23	0,33	0,53	0,57	0,69	0,62	0,6
r	HS	0,6	0,73	0,83	0,58	0,63	0,82	0,92	0,9	0,74	0,73	0,78	0,88
	TC	0,57	0,71	0,83	0,57	0,6	0,81	0,91	0,89	0,72	0,72	0,76	0,89
	CM	0,4	0,52	0,75	0,52	0,02	0,16	0,91	0,94	0,83	0,66	0,82	0,93
	JH	0,63	0,74	0,84	0,59	0,66	0,83	0,93	0,9	0,76	0,73	0,79	0,89
	RS	0,57	0,7	0,83	0,58	0,6	0,81	0,91	0,89	0,72	0,72	0,77	0,87
c	HS	0,25	0,21	0,3	0,18	0,19	0,32	0,52	0,71	0,34	0,27	0,42	0,73
	TC	0,15	0,15	0,22	0,13	0,12	0,21	0,34	0,56	0,51	0,41	0,61	0,58
	CM	0,06	0,06	0,12	0,07	0,003	0,02	0,27	0,48	0,51	0,4	0,43	0,39
	JH	0,07	0,07	0,11	0,06	0,05	0,09	0,14	0,18	0,08	0,07	0,1	0,22
	RS	0,14	0,13	0,2	0,12	0,11	0,19	0,3	0,47	0,41	0,5	0,47	0,52
EAM	HS	0,34	0,61	0,63	0,55	0,45	0,39	0,32	0,12	0,28	0,36	0,26	0,15
	TC	0,66	0,94	0,95	0,86	0,76	0,69	0,61	0,24	0,09	0,15	0,08	0,26
	CM	1,17	1,57	1,67	1,57	1,32	1,05	0,83	0,46	0,12	0,09	0,22	0,73
MSE	JH	1,92	2,16	2,21	2,11	2,01	1,98	2	1,85	1,76	1,7	1,69	1,74
	RS	0,77	1,05	1,07	0,97	0,85	0,8	0,74	0,42	0,17	0,09	0,17	0,41
	HS	0,13	0,38	0,41	0,32	0,21	0,16	0,11	0,02	0,08	0,13	0,07	0,03
CMR	TC	0,45	0,89	0,93	0,76	0,58	0,49	0,39	0,08	0,01	0,02	0,01	0,1
	CM	1,4	2,49	2,81	2,51	1,78	1,12	0,71	0,23	0,02	0,01	0,06	0,6
	JH	3,7	4,67	4,89	4,47	4,05	3,94	4	3,46	3,13	2,91	2,89	3,05
	RS	0,62	1,11	1,16	0,95	0,74	0,65	0,56	0,2	0,03	0,01	0,04	0,2
	HS	-0,094	-0,18	-0,19	-0,16	-0,13	-0,11	-0,08	0,003	0,05	0,06	0,05	0,0009
	TC	-0,18	-0,28	-0,28	-0,26	-0,22	-0,2	-0,16	-0,05	0,01	0,02	0,006	-0,06
	CM	-0,32	-0,47	-0,5	-0,47	-0,39	-0,3	-0,22	-0,1	-0,02	-0,01	-0,04	-0,17
	JH	-0,53	-0,65	-0,66	-0,63	-0,6	-0,57	-0,53	-0,41	-0,34	-0,32	-0,34	-0,41
	RS	-0,21	-0,31	-0,32	-0,29	-0,25	-0,23	-0,19	-0,09	-0,03	-0,01	-0,03	-0,09

d = índice de concordância de Willmot, r= coeficiente de correlação, c= coeficiente de desempenho. EAM = Erro Absoluto Médio; MSE = Erro Quadrático Médio; CMR = Coeficiente de Massa Residual.

RS é indicado para regiões onde não há dados meteorológicos suficientes para a aplicação do modelo PM. RS utiliza um coeficiente de ajuste baseado na umidade relativa e velocidade do vento, entretanto esse coeficiente utiliza como base as médias anuais dessas variáveis, subestimando as variações ao longo do ano. O modelo necessita, para o melhor desempenho, um ajuste nos coeficientes utilizados para obter ET.

Ainda na tabela 5, CM apresentou os melhores resultados de desempenho entre julho e dezembro. Isto pode ser explicado, uma vez que CM leva em consideração valores de radiação solar, e estes valores são maiores no segundo semestre, tornando o método mais eficiente.

No estado do Rio Grande do Sul, em trabalhos desenvolvidos por Pilau et al. (2012), o método CM apresentou os melhores desempenhos,

em uma escala de 30 dias, entre os modelos que utilizam como entrada os dados de temperatura do ar.

O modelo TC apresentou o segundo melhor desempenho, entre os modelos baseados apenas em temperatura (HS, TC e CM). O método proposto por TC utiliza um coeficiente de ajuste para considerar a influência da umidade nos valores de ET. Entretanto quando a umidade é maior que 50 %, o modelo desconsidera a influência, tanto positiva quanto negativa, da umidade nos dados de ET. Sabe-se, de acordo com Cavalcante Junior et al. (2011) que a umidade apresenta uma correlação negativa com o processo de ET.

O método que apresentou o pior resultado de desempenho entre todos os estudados, foi o de JH. Moura et al. (2013), em estudo na Bacia do Riacho Gameleira, estado de Pernambuco, concluiu que JH tem um desempenho “Bom” em uma escala diária, para Macapá não se observou o mesmo desempenho em escala mensal, variando entre 0,05 e 0,22, considerado péssimo, talvez devido as diferenças entre as características climatológicas de Macapá e o local de desenvolvimento do modelo JH.

Para Pernambuco, em estudo de Moura et al. (2013), JH teve apenas desempenho “mediano” em uma escala de 30 dias e desempenho “Bom” em uma escala de 1 – 5 dias. Já Cavalcante Junior et al. (2011), aplicou JH para Mossoró, Rio Grande do Norte, e encontrou valores de desempenho ótimo no período seco, e mediano no período úmido.

CM é o que tem menor valor de correlação entre janeiro e junho. Apresentando um valor máximo de 0,75 em março e um mínimo em maio de 0,02. Já entre julho e dezembro os métodos tiveram um comportamento muito idêntico. De maneira geral, os métodos HS, TC, JH e RS apresentam um valor médio de correlação em torno de 0,75. E o que apresentou maior valor de correlação foi CM no mês de agosto com 0,94.

Em relação ao índice de concordância, o método HS foi o que obteve melhor resultado, sendo os meses de agosto e dezembro os que apresentaram respostas mais satisfatórias, com valores de 0,79 e 0,83. Já nos meses de setembro, outubro e novembro, foi RS quem apresentou melhor resposta. O método que apresentou o pior resultado em relação ao índice de concordância foi JH, com valor mínimo de 0,09 para o mês de maio.

Ao analisar os resultados do CMR, os métodos CM, JH e RS apresentaram valores negativos em todos os meses, ou seja, superestimaram a ET do método PM. O CMR, para TC, apresentou apenas nos meses de setembro a novembro uma ligeira subestimativa e nos demais meses superestimaram os valores de ET. Já HS superestimou de janeiro a julho e subestimou nos demais meses.

O mês em que JH mais superestimou (CMR) foi março, com -0,66 mm/dia, já em outubro, apresentou a menor tendência em superestimar a ET, apresentando o menor valor de CMR, -0,32 mm/dia. E segundo Fernandes et al. (2010), por este

modelo ter sido desenvolvido para regiões áridas e semiáridas, pode apresentar este tipo de resposta.

O comportamento observado no semiárido nordestino por Cavalcante Junior et al. (2011), corrobora os resultados das análises feitas pelo mesmo método para o município de Macapá, onde apesar de em todos os meses o modelo JH apresentar resultados péssimos, os menores valores de erro absoluto médio e os menores coeficientes residual de massa estão concentrados no segundo semestre, período com baixa precipitação, baixa umidade e alta taxa de radiação solar.

Ao se observar os valores de EAM para todos os modelos, nota-se que ocorreu uma tendência em superestimar os valores de ET para todos os meses do ano. As maiores superestimativas ocorreram no método JH, com valores entre 1,69 e 2,21. Já o método HS foi o que apresentou os menores valores mensais, variando entre 0,12 e 0,63.

Em estudos realizados por Silva et al. (2011) em Minas Gerais, o método de CM apresentou tendência em superestimar os dados de ET, com resultado apenas mediano, o que concorda com os resultados obtidos para Macapá.

JH apresentou os maiores valores de ET e por conseguinte os maiores valores de EAM. Apesar da tendência de superestimar os valores de ET, o método de JH apresentou uma forte correlação, devido ao comportamento dos dados de ET estimados por este método, em comparação com PM.

Entre os modelos que utilizam dados de temperatura (HS, TC e CM), CM foi o de o pior desempenho. Este modelo foi desenvolvido a partir da simplificação do modelo de Thornthwaite que é utilizado para a determinação do balanço hídrico. Essa metodologia é mais comumente aplicada em uma escala mensal ou diária. Quando aplicada a uma escala maior, como a anual ou semestral, tende a potencializar os erros de estimativas.

Quanto ao MSE, na Tabela 5, observa-se que o modelo de HS apresentou os menores valores, em especial para os meses de agosto e dezembro, com 0,02 e 0,03. Exceto para os meses de setembro a novembro em que RS apresentou menores resultados. Já JH foi o que apresentou os piores resultados, com valores acima de 4. E segundo Hallak & Filho (2011) um MSE de zero (0) é o ideal, pois demonstra que o estimador prevê observações com maior precisão.

Na Figura 2 são apresentadas, para todos os métodos, as correlações, os coeficientes angular, linear e de determinação (R^2) entre as diferentes metodologias de estimativa de ET e o modelo PM. Nesta Figura temos uma pequena dispersão dos dados, com R^2 acima de 0,90 para HS (2a), TC (2b), JH (2d) e RS (2e). Em relação a exatidão, apenas JH apresentou resultados satisfatórios, com uma inclinação da reta igual a 1,22, os demais apresentaram valores muito distantes de 1. JH também foi o que apresentou menor coeficiente linear, apesar de ficar distante de zero.

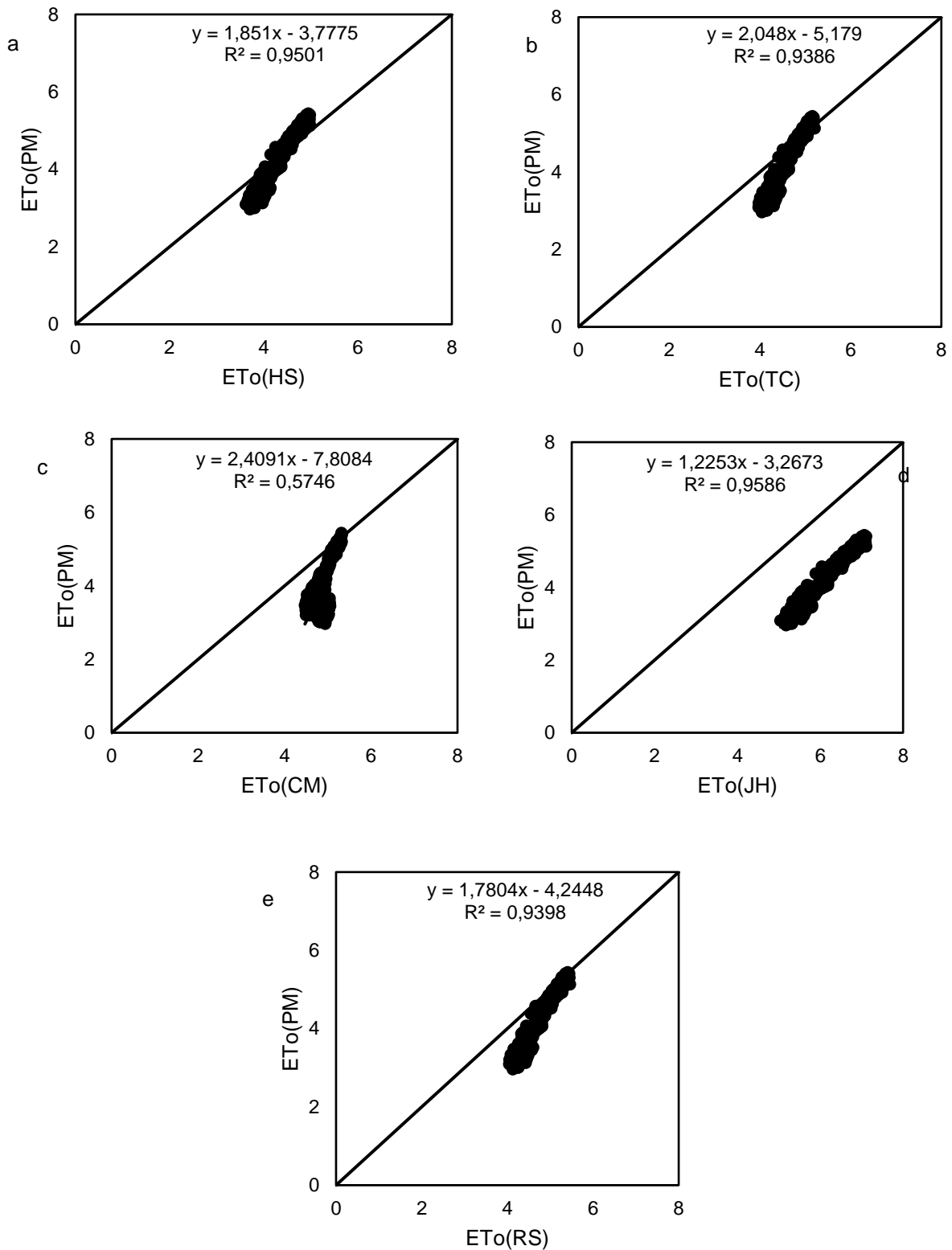


Figura 2. Comparação entre valores médios diários (mm) estimados por HS, TC, CM, JH e RS versus PM.

Ao se analisar a dispersão dos dados de JH em relação a PM observa-se uma tendência de JH em superestimar ET, mesmo com pequena dispersão e a melhor exatidão entre os modelos estudados.

Tanaka et al. (2016) em estudo para o estado do Mato Grosso, observou que TC apresentou baixa dispersão dos dados, e uma forte correlação com os

valores de ET padrão, o que corrobora com o encontrado para Macapá.

Um dos motivos para se explicar os resultados de TC, é que ele tem como variável de entrada, assim como HS, a temperatura do ar. Apesar de apresentar desempenho aceitável,

necessita de calibração para representar melhor as características do clima local.

O coeficiente de determinação, na Figura 2, apresentou uma grande dispersão com $R^2 = 0,57$ para CM (2c). O baixo valor de R^2 pode ser explicado pelo afastamento entre os valores estimado por CM e por PM, principalmente entre janeiro e junho.

Segundo Pereira et al. (2013), CM é uma versão simplificada do modelo de Thornthwaite, recomendando que este seja utilizado apenas em escalas de 10 a 30 dias. O método de Thornthwaite foi desenvolvido para regiões áridas ou semiáridas, sendo recomendado para determinação do balanço hídrico em escalas mensais.

Nesse contexto, os métodos que empregam apenas a temperatura do ar podem apresentar certas limitações, uma vez que apesar da umidade presente no ar estar diretamente relacionada a mudança da temperatura, pode ocorrer variações de umidade sem que a temperatura seja alterada, e conseqüentemente uma variação na demanda hídrica (Tanaka et al., 2016).

Ao se observar $R^2 = 0,93$ entre os dados estimados por PM e RS, percebe-se que ET estimada por RS, superestimou os seus valores em comparação com PM.

Em trabalho de Costa et al. (2017), para Arapiraca - AL, o método RS encontrou resultados de desempenho considerados ótimos, apesar de superestimar os valores de ET. E segundo Matos & Silva (2016), ao aplicar o método RS para Barbalha no Ceará, este foi o único método que mais se aproximou de ET estimada por Penman.

A tendência a superestimar pode ser explicada devido a simplicidade do modelo de radiação solar, que conta somente com uma variável de entrada. Outro motivo que justifica essa tendência é a utilização de coeficiente de ajuste baseado em dados climatológicos diferentes dos observados na região estudada no nosso trabalho, e subestimando a influência de outros fatores como a temperatura média.

Conclusões

Com base no que foi exposto neste trabalho, conclui-se que o Método de HS foi o que apresentou a melhor avaliação em comparação com o método Padrão de PM, sendo seguido pelos métodos de Turc e Radiação Solar.

O método RS foi o modelo, entre os métodos que utilizam radiação solar como variável de entrada, mais eficiente em estimar os valores de ET, em comparação com PM.

Todos os métodos estudados apresentaram tendência a superestimar os valores de ET, em comparação com PM. O método JH foi o que apresentou a maior taxa de superestimação.

Agradecimento

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, por meio do Programa Institucional de Bolsas de Iniciação Científica - PIBIC.

Referências

ALENCAR, L. P.; SEDIYAMA, G. C.; MANTOVANI, E. C. Estimativa da Evapotranspiração de Referência (ETO padrão FAO), para Minas Gerais, na ausência de alguns dados climáticos. *Revista Engenharia Agrícola*, v.35, n.1, p. 39-50, 2015.

ALMEIDA, H. A.; HERMENEGIDIO, G. M. S. Comparação de dados meteorológicos obtidos por estações meteorológicas convencional e automática. *Revista Brasileira de Climatologia*, v.12, p.32-47, 2013.

ANDRADE, A. D.; MIRANDA, W. L.; CARVALHO, L. G.; FIGUEIREDO, P. H. F.; SILVA, T. B. S. Desempenho de métodos de cálculo do coeficiente de tanque para estimativa da evapotranspiração de referência. *Irriga, Botucatu*, v.21, n.1, p.119-130, 2016.

BELÚCIO, L. P.; SILVA, A. P. N.; SOUZA, L. R.; MOURA, G. B. D. A. Radiação solar global estimada a partir da insolação para Macapá – AP. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.29, n.4, p.494-504, 2014.

CARVALHO, D.F. DE; ROCHA, H.S. DA; BONOMO, R.; SOUZA, A.P. de. Estimativa da evapotranspiração de referência a partir de dados meteorológicos limitados. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.50, p.1-11, jan. 2015.

CARVALHO, L. G.; RIOS, G. F. A.; MIRANDA, W. L.; NETO, P. C. Evapotranspiração de referência: uma abordagem atual de diferentes métodos de estimativa. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, Goiânia, v.41, n.3, p.456-465, 2011.

CAVALCANTE JUNIOR, E. G.; OLIVEIRA, A. D.; ALMEIDA, B. M.; SOBRINHO, J. E. Métodos de estimativa da evapotranspiração de referência para as condições do semiárido nordestino. *Semina: ciências agrárias, londrina*, v.32, suplemento 1, p.1699-1708, 2011.

COSTA, L. F. F.; DA SILVA, J. C.; DA SILVA C. B., DOS SANTOS, S. B. T.; DOS SANTOS, D. P.; DOS SANTOS, M. A. L. Estimativa da evapotranspiração de referência por diferentes métodos para o município de Arapiraca- AL. *IV Inovagri International Meeting*, 2017.

FERNANDES, D. S.; HEINEMANN, A. B.; PAZ, R. L.; AMORIM, A. o. Evapotranspiração – uma revisão sobre os métodos empíricos. *Documentos 263*. Santo Antônio de Goiás: Embrapa arroz e feijão, 44p. 2010.

HALLAK, R.; FILHO, A. J. P. Metodologia para análise de desempenho de simulações de sistemas convectivos na região metropolitana de São Paulo com o modelo ARPS: sensibilidade a variações com

- os esquemas de advecção e assimilação de dados. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.26, n.4, p.591 - 608, 2011.
- IDE, A. K. Cálculo da evapotranspiração de referência e da necessidade de irrigação ao longo do projeto de integração do rio São Francisco. 152f. (Dissertação de Mestrado) - Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, 2016.
- LIMA JUNIOR, J. C.; ARRAES, F. D. D.; OLIVEIRA, J. B.; NASCIMENTO, A. L.; MACÊDO, K. G. Parametrização da equação de Hargreaves-Samani para estimativa da evapotranspiração de referência no estado de Ceará, Brasil. *Revista Ciência Agronômica*, v.47, n.3, p.447-454, 2016.
- MATOS, R. M.; SILVA, P. F. Análise de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência mensal para o município de Barbalha-CE. *Agropecuária Científica no Semiárido*, v.12, n.1, p.10-21, 2016.
- MOURA, A. R. C.; MONTENEGRO, S. M. G. L.; ANTONINO, A. C. D.; AZEVEDO, J. R. G. D.; SILVA, B. B. D.; OLIVEIRA, L. M. M. D. Evapotranspiração de referência baseada em métodos empíricos em bacia experimental no estado de Pernambuco – Brasil. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.28, n.2, p.181- 191, 2013.
- PALARETTI, L. F.; MANTOVANI, E. C.; SEDIYAMA, G. C. Análise da sensibilidade dos componentes da equação de Hargreaves-Samani para a região de Bebedouro – SP. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.29, n.2, p.299 - 306, 2014.
- PEREIRA, A. R.; SEDIYAMA, G. C.; VILLA NOVA, N. A. Evapotranspiração. Campinas - SP: Fundag, 323p. 2013.
- PILAU, F. G.; BATTISTI, R.; SAMOVILLA, L.; RIGUI, E. Z. Desempenho de métodos de estimativa da evapotranspiração de referência nas localidades de Frederico Westphalen e Palmeira das Missões, RS. *Ciência Rural*, Santa Maria, v.42, n.2, p.283-290, 2012.
- SANCHES, F. M.; XIMENES, A. R.; CORADI, P. C.; ROQUE, C. G.; CUNHA, F. F. Estimativa da evapotranspiração de referência na região norte do Brasil. *Revista de Ciências Agroambientais, Alta Floresta - MT*, v.13, n.2, p.19-31, 2015.
- SILVA, V. J.; CARVALHO, H. P.; DA SILVA, C. R.; CAMRGO, R.; TEODORO, R. E. F. Desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração de referência diária em Uberlândia, MG. *Bioscience Journal*, Uberlândia, v.27, n.1, p. 95-101, 2011.
- TANAKA, A. A.; SOUZA, A. P. DE; KLAR, A. E.; SILVA, A. C. DA; GOMES, A. W. A. Evapotranspiração de referência estimada por modelos simplificados para o estado do Mato Grosso. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.51, n.2, p.91-104, 2016.
- TAVARES, J. P. N. Características da climatologia de Macapá – AP. *Caminhos de Geografia*, Uberlândia, v.15, n.50, p.138-151, 2014.
- VENTANA SYSTEMS. Vensim Simulation Software. Disponível em: <<http://www.vensim.com>>. Acesso em: 23 abr. 2020.