

## SELEÇÃO DO MODELO MORETTI-JERSZURK-SILVA LINEAR OU QUADRÁTICO PARA ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA NA PERIODICIDADE HORÁRIA, PARA O CLIMA Af

SANTOS, A. A. <sup>1</sup>; SOUZA, J. L. M. <sup>1</sup>

Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo do Departamento de Solos e Engenharia Agrícola - Rua dos Funcionários, 1540 – CEP 80035 050 Curitiba PR.

### RESUMO

Teve-se por objetivo no presente estudo calibrar, validar e selecionar o modelo Moretti-Jerszurk-Silva (*MJS*) linear ( $ET_{O_{MJS}(\Psi_{ar})_{L,h}}$ ) ou quadrático ( $ET_{O_{MJS}(\Psi_{ar})_{Q,h}}$ ) de melhor desempenho para estimar a *ET<sub>o</sub>* na periodicidade horária e determinar a necessidade de ajuste de descompasso do modelo *MJS* para o clima Af, com ocorrência no Brasil. Nas análises, foram utilizados dados de cinco estações meteorológicas (Belém-PA, Cruz das Almas-BA, Cruzeiro do Sul-AC, Itacoatiara-AM e Salvador-BA) do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), localizadas em regiões contendo o tipo climático Af. Na calibração dos coeficientes linear (“a” e “b”) e quadrático (“a”, “b” e “c”) do *MJS* associou-se respectivos valores de potencial hídrico atmosférico ( $\Psi_{ar}$ ) e evapotranspiração de referência estimada com o método de Penman Monteith – ASCE ( $ET_{O_{ASCE}}$ ), utilizando-se dados meteorológicos horários, medidos entre 01/01/2017 e 01/12/2019. A validação consistiu de associações entre os respectivos valores de “ $ET_{O_{MJS}(\Psi_{ar})_{L,h}}$  vs  $ET_{O_{ASCE}}$ ” ou “ $ET_{O_{MJS}(\Psi_{ar})_{Q,h}}$  vs  $ET_{O_{ASCE}}$ ”, estimadas com dados meteorológicos medidos entre 02/12/2019 e 31/12/2020. As análises foram realizadas considerando o período anual dos dados, primavera, verão outono e inverno. O desempenho do modelo *MJS* foi avaliado baseando-se nos indicadores estatísticos: Raiz quadrada do erro quadrado médio (*RMSE*); correlação (*r*); e, eficiência de Nash-Sutcliffe (*NSE*). O modelo *MJS* linear foi mais indicado para o clima Af, em todas as estações meteorológicas e intervalos de tempo analisados. Mesmo quando a *r* foi maior para o modelo quadrático, a diferença estatística entre os modelos foi inferior a 5% de significância. Os coeficientes “a” e “b” do *MJS* linear ficaram entre  $-9,31E-02$  e  $-5,32E-02$  e entre  $-8,13E-08$  e  $-7,03E-08$ , respectivamente. A correção do descompasso de uma hora entre os valores de *ET<sub>o</sub>* estimados com o *MJS.a* em relação ao *ASCE* melhorou significativamente os indicadores que avaliaram as associações “ $ET_{O_{MJS}(\Psi_{ar})_{L,h}}$  vs  $ET_{O_{ASCE}}$ ”. Contudo, devido aos baixos *NSE*, o modelo *MJS.a* linear horário é uma alternativa adequada somente quanto as variáveis climáticas necessárias ao modelo *ASCE* padrão não estiverem disponíveis nas localidades de clima Af.

**Palavras-chave:** Relações hídricas horárias; Modelos alternativos; Potencial hídrico atmosférico.

### INTRODUÇÃO

A evapotranspiração de referência (*ET<sub>o</sub>*) é uma das componentes do balanço hídrico, e corresponde as perdas de água por evaporação na superfície do solo e transpiração da planta. O estudo da *ET<sub>o</sub>* é importante para obtenção de dados precisos para realização do

planejamento do uso dos recursos hídricos e manutenção da qualidade do solo (Paredes et al., 2020). Quando há falta de água para as plantas tem-se a diminuição da abertura estomática, diminuindo as taxas de transpiração e fotossintética (Subedi et al., 2019), podendo haver perda de produtividade se ocorrer déficit hídrico.

Muitos métodos indiretos de estimativa da evapotranspiração de referência ( $ET_o$ ) foram desenvolvidos ao longo dos tempos, e atualmente o modelo da *American Society of Civil Engineers* (ASCE-EWRI, 2005) é considerado padrão na literatura para estimar a  $ET_o$  na periodicidade diária e horária. O modelo ASCE considera fatores internos da planta (fenológicos) e meteorológicos ( $R_n$  – saldo de radiação solar,  $UR$  – umidade relativa do ar,  $T$  – temperatura do ar e  $u_2$  – velocidade do vento a dois metros de altura). Contudo, os dados meteorológicos necessários como entrada no ASCE nem sempre estão disponíveis, principalmente quando trata-se de localidade remotas. Por esse motivo, modelos alternativos que demandam menos variáveis meteorológicas de entrada (alternativos) vem sendo estudados e sugeridos (Jerszurki et al., 2017; Santos et al., 2021b; Rosa, 2023).

Tran et al. (2019) consideram que os modelos para estimativa da  $ET_o$  na periodicidade horária apresentam maior precisão que os destinados à estimativa na periodicidade diária. No entanto, apesar da existência de modelos alternativos ao ASCE, poucos métodos estimam a  $ET_o$  na periodicidade horária. Dentre os modelos alternativos encontrados na literatura, Jerszurki et al. (2017) verificaram que o Moretti-Jerszurki-Silva (MJS) linear estimou bem a  $ET_o$  diária para os tipos climáticos brasileiros. Oliveira (2018) iniciou estudos com o MJS para a estimativa da  $ET_o$  horária, e obteve resultados promissores na calibração das funções lineares e quadráticas. Posteriormente, Santos et al. (2021b) verificaram a necessidade de ajuste de um descompasso da  $ET_o$  horário estimada com os modelos MJS e ASCE, que tem como motivo a diferenças das variáveis climáticas de entrada. Contudo, os estudos envolvendo o modelo MJS não verificaram estatisticamente a forma de seleção do modelo MJS linear ou quadrático. Oliveira (2018) abordou aspectos sobre a seleção dos modelos MJS, mas não definiu critério estatístico para realizar a sua escolha.

Diante do contexto apresentado, teve-se por objetivo no presente estudo calibrar, validar e selecionar o modelo Moretti-Jerszurki-Silva (MJS) linear ( $ET_{oMJS(\Psi_{ar})L,h}$ ) ou quadrático ( $ET_{oMJS(\Psi_{ar})Q,h}$ ) de melhor desempenho para estimar a  $ET_o$  na periodicidade horária e determinar a necessidade de ajuste de descompasso do modelo MJS para o clima Af, com ocorrência no Brasil.

## MATERIAL E MÉTODOS

As análises foram realizadas com dados de cinco estações meteorológicas do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), pertencentes às regiões de clima classificado como Af (Tabela 1). Foram utilizados dados de temperatura média do ar ( $T$ ; °C), umidade relativa do ar ( $UR$ ; %), radiação solar incidente ( $R_s$ ;  $\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ) e velocidade do vento a dois metros de altura ( $u_2$ ;  $\text{m s}^{-1}$ ). Os valores médios das variáveis meteorológicas utilizadas foram analisados graficamente, conforme suas tendências por hora, visando identificar e utilizar um banco de dados sem discrepâncias. Para isso, utilizou-se o *software* R (RStudio Team, 2023; versão 4.2.3), pacote “ggplot2” (Wickham et al., 2022).

Tabela 1 – Estações meteorológicas do instituto nacional de meteorologia (INMET), clima *Af*, que tiveram os dados meteorológicos utilizados no presente estudo.

Clima	Estações	Estado	Latitude (graus)	Longitude (graus)	Altitude (m)
<i>Af</i>	Belém	PA	-1,4330	-48,433	10,0
	Cruz das Almas	BA	-12,667	-39,083	225,9
	Cruzeiro do Sul	AC	-07,600	-72,670	220,0
	Itacoatiara	AM	-03,133	-58,433	40,0
	Salvador	BA	-13,005	-38,506	51,4

O modelo da *American Society of Civil Engineers* (ASCE-EWRI, 2005) foi considerado padrão (Equação 1) para realizar a estimativa da evapotranspiração de referência (*ET<sub>o</sub>*).

$$ET_{O_{ASCE.h}} = \frac{(0,408 \cdot \Delta_h \cdot (Rn_h - G_h) + \gamma \cdot \frac{Cn}{(T_h + 273)} \cdot u_{2.h} \cdot (es_h - ea_h))}{\Delta_h + \gamma \cdot (1 + Cd \cdot u_{2.h})} \quad (\text{Eq. 1})$$

Sendo: *ET<sub>O<sub>ASCE.h</sub></sub>* – Evapotranspiração de referência da *h*-ésima hora (mm h<sup>-1</sup>);  $\Delta_h$  – declividade da curva de pressão de vapor da água à temperatura do ar da *h*-ésima hora (kPa °C<sup>-1</sup>); 0,408 – coeficiente da equação (m<sup>2</sup> mm MJ<sup>-1</sup>); *Rn<sub>h</sub>* – saldo de radiação ou radiação líquida na superfície da *h*-ésima hora (MJ m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>); *G<sub>h</sub>* – balanço do fluxo de calor no solo da *h*-ésima hora (MJ m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>);  $\gamma$  – constante psicrométrica (kPa °C<sup>-1</sup>); *Cn* – constante relacionada ao tipo de vegetação e escala de tempo considerada (*Cn<sub>horário</sub>* = 37 K mm s<sup>3</sup> Mg<sup>-1</sup> h<sup>-1</sup> para cobertura do solo com grama curta); *T<sub>h</sub>* – temperatura média do ar da *h*-ésima hora (°C); *u<sub>2.h</sub>* – velocidade do vento a dois metros de altura da *h*-ésima hora (m s<sup>-1</sup>); *es<sub>h</sub>* – pressão de saturação de vapor da *h*-ésima hora (kPa); *ea<sub>h</sub>* – pressão atual do vapor da *h*-ésima hora (kPa); *Cd* – constante relacionada ao tipo de vegetação e escala de tempo considerada (*Cd<sub>diurno</sub>* = 0,24 s m<sup>-1</sup> para período diurno e grama curta, ou *Cd<sub>noturno</sub>* = 0,96 s m<sup>-1</sup> para período noturno e grama curta).

Como alternativa para estimativa da *ET<sub>o</sub>* horária utilizou-se o modelo *MJS* que considera apenas o potencial hídrico atmosférico do ar ( $\Psi_{ar}$ ) como entrada, sendo ajustado para as funções linear (*ET<sub>O<sub>MJS</sub>( $\Psi_{ar}$ )L.h</sub>*; Equação 2) e quadrática (*ET<sub>O<sub>MJS</sub>( $\Psi_{ar}$ )Q.h</sub>*; Equação 3):

$$ET_{O_{MJS(\Psi_{ar})L.h}} = a + b \cdot \Psi_{ar.h} \quad (\text{Eq. 2})$$

$$ET_{O_{MJS(\Psi_{ar})Q.h}} = a \cdot \Psi_{ar.h}^2 + b \cdot \Psi_{ar.h} + c \quad (\text{Eq. 3})$$

$$\Psi_{ar.h} = \frac{R \cdot T_h}{M_v} \cdot \ln\left(\frac{ea_h}{es_h}\right) \quad (\text{Eq. 4})$$

Sendo: *ET<sub>O<sub>MJS</sub>( $\Psi_{ar}$ )L.h</sub>* e *ET<sub>O<sub>MJS</sub>( $\Psi_{ar}$ )Q.h</sub>* – Evapotranspiração de referência estimada com o modelo *MJS*, ajustados às funções linear e quadrática, respectivamente, considerando o potencial hídrico atmosférico da *h*-ésima hora (mm h<sup>-1</sup>);  $\Psi_{ar.h}$  – potencial hídrico atmosférico da *h*-ésima hora (MPa); “*a*”, “*b*” e “*c*” – coeficientes obtidos nas análises de regressão da associação “ $\Psi_{ar.h}$  vs *ET<sub>O<sub>ASCE.h</sub></sub>*” do processo de calibração, na periodicidade horária (Equação 2: coeficientes “*a*” em mm h<sup>-1</sup> e “*b*” em mm h<sup>-1</sup> MPa<sup>-1</sup>; Equação 3: coeficientes “*a*” em mm

$h^{-1} \text{ MPa}^{-2}$ ; “ $b$ ” em  $\text{mm h}^{-1} \text{ MPa}^{-1}$ ; e “ $c$ ” em  $\text{mm h}^{-1}$ );  $R$  – Constante universal dos gases perfeitos ( $8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ );  $T_h$  – temperatura média do ar da  $h$ -ésima hora (K);  $M_v$  – Massa molar da água ( $18 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ mol}^{-1}$ );  $ea_h$  – pressão atual de vapor da  $h$ -ésima hora (MPa);  $es_h$  – pressão de saturação de vapor da  $h$ -ésima hora (MPa). As variáveis  $ea_h$  e  $es_h$  foram estimadas conforme *American Society of Civil Engineers* (ASCE-EWRI, 2005).

As análises com os modelos *MJS* foram realizadas em duas etapas:

i) Primeira etapa: Conforme Jerszurki et al. (2017) e Souza et al. (2021), consistiu no cálculo das séries de valores de  $\Psi_{ar,h}$  (Equação 4) e  $ETO_{ASCE,h}$  (Equação 1). Em seguida realizou-se a calibração por meio de análises de regressão linear e quadrática entre “ $\Psi_{ar,h}$  vs  $ETO_{ASCE,h}$ ”, obtendo-se os coeficientes “ $a$ ” e “ $b$ ” da função linear e “ $a$ ”, “ $b$ ” e “ $c$ ” da função quadrática, para serem utilizados nas Equações 2 e 3, respectivamente. A calibração foi realizada para as cinco estações meteorológicas brasileiras analisadas, considerando dados climáticos medidos entre 01/01/2017 e 01/01/2019;

ii) Segunda etapa: Consistiu em analisar o desempenho dos modelos *MJS* que estimam a *ETO* com as funções linear ( $ETO_{MJS(\Psi_{ar})L,h}$ ; Equação 2) e quadrática ( $ETO_{MJS(\Psi_{ar})Q,h}$ ; Equação 3), em associações “ $ETO_{MJS(\Psi_{ar})L,h}$  vs  $ETO_{ASCE,h}$ ” e “ $ETO_{MJS(\Psi_{ar})Q,h}$  vs  $ETO_{ASCE,h}$ ”, respectivamente. As análises de validação foram feitas para cinco estações meteorológicas, utilizando dados meteorológicos medidos entre 02/12/2019 e 31/12/2020.

A seleção dos modelos *MJS* de melhor ajuste (quadrático ou linear) foi realizada após a calibração para a obtenção de seus coeficientes. Por ser mais complexo, optou-se por selecionar o modelo quadrático somente quando o coeficiente de correlação ( $r_{quadrática}$ ) da associação “ $ETO_{MJS(\Psi_{ar})Q,h}$  vs  $ETO_{ASCE}$ ” fosse superior a 5% do  $r_{linear}$  da associação “ $ETO_{MJS(\Psi_{ar})L,h}$  vs  $ETO_{ASCE}$ ”.

Após as análises de calibração e validação, verificou-se a existência de descompasso entre a *ETO* horária estimada com os modelos Moretti-Jerszurki-Silva ( $ETO_{MJS(\Psi_{ar})L,h}$  ou  $ETO_{MJS(\Psi_{ar})Q,h}$ ) e *ASCE-PM* ( $ETO_{ASCE,h}$ ). O tempo de ajuste do descompasso foi determinado baseando-se no coeficiente de correlação das associações “ $ETO_{MJS(\Psi_{ar})L,h}$  vs  $ETO_{ASCE,h}$ ” ou “ $ETO_{MJS(\Psi_{ar})Q,h}$  vs  $ETO_{ASCE,h}$ ”. Após a verificação e quantificação dos descompassos, uma nova validação com as “ $ETO_{MJS(\Psi_{ar})L,h}$  vs  $ETO_{ASCE,h}$ ” ou “ $ETO_{MJS(\Psi_{ar})Q,h}$  vs  $ETO_{ASCE,h}$ ” foi realizada para verificar se houve melhorias dos indicadores estatísticos.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2 encontram-se os resultados obtidos nas associações “ $\Psi_{ar}$  vs  $ETO_{ASCE}$ ” para funções linear (obtendo-se os coeficientes “ $a$ ” e “ $b$ ”) e quadrática (obtendo-se os coeficientes “ $a$ ”, “ $b$ ” e “ $c$ ”). As correlações ( $r$ ) indicaram que os modelos linear e quadrático foram iguais estatisticamente. Considerando o valor a 5% de significância, a diferença entre os modelos linear e quadrático foram muito baixas  $0,00 \geq r > 0,03$ . Para a comparação entre polinômios, NASA (2009) considera que em ajustes iguais estatisticamente é preferível escolher o polinômio de grau menor (coeficientes), por explicar o fenômeno com maior simplicidade. Diante disso, o modelo linear foi o indicado para todas as localidades e intervalos de tempo analisadas para o clima *Af*.

Tabela 2 – Coeficientes dos modelos Moretti-Jesrszurki-Silva horário (linear e quadrático), obtidos na calibração associando “ $\Psi_{ar}$  vs  $ETo_{ASCE}$ ” para as estações meteorológicas localizadas em clima *Af*, e respectivos coeficientes de correlação (“ $r$ ”; adimensional), diferença dos “ $r$ ” linear e quadrático, e seleção do modelo.

Localidades	Período	--- Modelo linear <sup>(1)</sup> ---			----- Modelo quadrático <sup>(1)</sup> -----				Diferença <sup>(2)</sup>	Selecionado <sup>(3)</sup>
		<i>a</i>	<i>b</i>	<i>r</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>r</i>		
Belém-PA	Anual	-4,69E-02	-5,712E-08	0,76	-1,539E-15	-7,169E-08	-6,64E-02	0,76	0,00	Linear
	Primavera	-2,81E-02	-4,184E-08	0,61	-1,912E-15	-6,11E-08	-5,87E-02	0,61	0,01	Linear
	Verão	-3,93E-02	-6,544E-08	0,77	-9,949E-16	-7,26E-08	-4,61E-02	0,77	0,00	Linear
	Outono	-6,07E-02	-7,362E-08	0,86	-1,536E-15	-8,61E-08	-7,44E-02	0,86	0,00	Linear
	Inverno	-6,07E-02	-7,362E-08	0,86	-1,536E-15	-8,61E-08	-7,44E-02	0,86	0,00	Linear
Cruz das Almas-BA	Anual	5,65E-03	-5,86E-08	0,84	-2,41E-15	-8,45E-08	-2,43E-02	0,85	0,01	Linear
	Primavera	-9,11E-03	-6,34E-08	0,86	-2,02E-15	-8,38E-08	-3,20E-02	0,87	0,01	Linear
	Verão	-3,00E-02	-5,50E-08	0,87	-1,15E-15	-6,98E-08	-5,45E-02	0,87	0,00	Linear
	Outono	6,26E-03	-6,95E-08	0,82	-3,92E-15	-1,02E-07	-2,40E-02	0,84	0,01	Linear
	Inverno	-1,99E-03	-7,52E-08	0,84	-3,76E-15	-1,01E-07	-2,13E-02	0,85	0,01	Linear
Cruzeiro do Sul-AC	Anual	-5,66E-03	-5,97E-08	0,79	-3,73E-15	-9,81E-08	-5,09E-02	0,82	0,03	Linear
	Primavera	-1,89E-02	-6,58E-08	0,82	-3,67E-15	-1,01E-07	-5,75E-02	0,83	0,01	Linear
	Verão	-3,29E-02	-8,26E-08	0,85	-4,52E-15	-1,11E-07	-6,10E-02	0,86	0,01	Linear
	Outono	-2,51E-02	-7,25E-08	0,83	-5,42E-15	-1,13E-07	-6,07E-02	0,84	0,01	Linear
	Inverno	9,10E-04	-4,45E-08	0,77	-1,97E-15	-7,07E-08	-4,08E-02	0,79	0,02	Linear
Itacoatiara-AM	Anual	-4,17E-02	-6,42E-08	0,73	-3,82E-15	-1,03E-07	-1,01E-01	0,75	0,02	Linear
	Primavera	-5,10E-02	-5,87E-08	0,73	-2,07E-15	-8,33E-08	-9,61E-02	0,74	0,01	Linear
	Verão	-7,16E-02	-8,76E-08	0,80	-3,17E-15	-1,12E-07	-1,00E-01	0,80	0,00	Linear
	Outono	-6,62E-02	-8,62E-08	0,76	-7,06E-15	-1,39E-07	-1,29E-01	0,78	0,01	Linear
	Inverno	-5,52E-02	-5,95E-08	0,74	-3,03E-15	-9,25E-08	-1,13E-01	0,75	0,01	Linear
Salvador-BA	Anual	-1,71E-01	-9,86E-08	0,81	3,50E-15	-6,56E-08	-1,11E-01	0,81	0,00	Linear
	Primavera	-2,18E-01	-1,13E-07	0,87	3,87E-15	-7,74E-08	-1,52E-01	0,87	0,00	Linear
	Verão	-2,38E-01	-1,00E-07	0,87	3,94E-15	-5,68E-08	-1,45E-01	0,87	0,00	Linear
	Outono	-1,42E-01	-9,90E-08	0,72	1,38E-14	4,91E-10	8,18E-04	0,74	0,03	Linear
	Inverno	-1,74E-01	-1,06E-07	0,77	1,20E-14	-1,48E-08	-3,36E-02	0,78	0,02	Linear

<sup>(1)</sup> Coeficientes dos modelos: Linear – “*a*” ( $\text{mm h}^{-1}$ ) e “*b*” ( $\text{mm h}^{-1} \text{MPa}^{-1}$ ); e, Quadrático – “*a*” ( $\text{mm h}^{-1} \text{MPa}^{-2}$ ), “*b*” ( $\text{mm h}^{-1} \text{MPa}^{-1}$ ) e “*c*” ( $\text{mm h}^{-1}$ ), <sup>(2)</sup> Diferença dos “*r*” linear e quadrático em módulo; <sup>(3)</sup> Optou-se por selecionar o modelo quadrático somente quando o coeficiente de correlação ( $r_{\text{quadrático}}$ ) da associação “ $ETo_{MJS}(\Psi_{ar})_{Q,h}$  vs  $ETo_{ASCE}$ ” foi superior a 5% do  $r_{\text{linear}}$  da associação “ $ETo_{MJS}(\Psi_{ar})_{L,h}$  vs  $ETo_{ASCE}$ ”.

Na Tabela 3 encontram-se os valores médios dos coeficientes lineares que podem ser utilizados em estudos considerando localidades de mesmo clima, para estimativa da  $ETo$ , com o modelo  $MJS$  na periodicidade horária. Os valores do coeficiente “*a*” ficaram entre  $-9,31E-02$  e  $-5,32E-02$ , e os coeficientes “*b*” entre  $-8,13E-08$  a  $-7,03E-08$ , com boas correlações obtidas nas associações  $ETo_{MJS}(\Psi_{ar})_{L,h}$  vs  $ETo_{ASCE}$  ( $0,78 > r > 0,5$ ).

Tabela 3 – Média dos coeficientes do modelo Moretti-Jesrszurki-Silva linear e horário (“*a*” e “*b*”), obtidos na calibração, associando “ $\Psi_{ar}$  vs  $ETo_{ASCE}$ ”, calculados com dados medidos nas estações meteorológicas localizadas em clima *Af*, e respectivos coeficientes de correlação (*r*) das associações.

Média do Clima	Período	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>r</i>
		( $\text{mm h}^{-1}$ )	( $\text{mm h}^{-1} \text{MPa}^{-1}$ )	adimensional
<i>Af</i>	Anual	-5,32E-02	-7,03E-08	0,79
	Primavera	-7,42E-02	-7,53E-08	0,82
	Verão	-9,31E-02	-8,13E-08	0,85
	Outono	-5,67E-02	-8,18E-08	0,78
	Inverno	-5,76E-02	-7,13E-08	0,78

Na Tabela 4 encontram-se os indicadores estatísticos obtidos nas associações “ $ET_{OMJS(\Psi_{ar})L,h}$  vs  $ET_{OASCE}$ ” antes e após a realização do ajuste do descompasso do modelo *MJS*. Para exemplificação, na Figura 1 encontra-se as análises realizadas para a estação meteorológica de Belém-PA. De forma geral, após o ajuste do descompasso entre os modelos *MJS* e *ASCE*, todos os indicadores estatísticos melhoraram ( $r$ ,  $RMSE$  e  $NSE$ ).

Tabela 4 – Indicadores estatísticos obtidos na validação, das associações entre “ $ET_{OMJS(\Psi_{ar})L,h}$  vs  $ET_{OASCE,h}$ ”, para as cinco estações meteorológicas localizadas em clima *Af*.

Localidades	Período	Modelo	----- “ $ET_{OASCE}$ vs $ET_{OMJS}$ ” -----			Ajuste Horas	----- “ $ET_{OASCE}$ vs $ET_{OMJS,a}$ ” -----		
			Antes do ajuste				Após ajuste		
			$r^{(1)}$	$RMSE^{(2)}$	$NSE^{(3)}$		$r^{(1)}$	$RMSE^{(2)}$	$NSE^{(3)}$
Belém-PA	Primavera	Linear	0,86	0,17	-1,11	1	0,90	0,16	-0,95
	Verão	Linear	0,88	0,10	0,54	1	0,88	0,09	0,62
	Outono	Linear	0,86	0,11	0,53	1	0,91	0,09	0,67
	Inverno	Linear	0,75	0,20	0,36	1	0,87	0,15	0,64
	Anual	Linear	0,81	0,13	0,39	1	0,86	0,12	0,52
Cruz das Almas-BA	Primavera	Linear	0,87	0,14	0,70	1	0,91	0,12	0,83
	Verão	Linear	0,88	0,13	0,74	1	0,91	0,11	0,83
	Outono	Linear	0,81	0,12	0,51	1	0,90	0,09	0,80
	Inverno	Linear	0,76	0,15	0,38	1	0,89	0,10	0,78
	Anual	Linear	0,86	0,13	0,66	1	0,91	0,11	0,82
Cruzeiro do Sul-AC	Primavera	Linear	0,82	0,13	0,46	1	0,88	0,11	0,60
	Verão	Linear	0,84	0,11	0,64	1	0,90	0,09	0,77
	Outono	Linear	0,83	0,12	0,63	1	0,90	0,09	0,79
	Inverno	Linear	0,74	0,16	0,25	1	0,81	0,14	0,44
	Anual	Linear	0,81	0,13	0,54	1	0,87	0,11	0,69
Itacoatiara-AM	Primavera	Linear	0,73	0,14	0,12	2	0,85	0,11	0,46
	Verão	Linear	0,77	0,13	0,46	2	0,83	0,12	0,60
	Outono	Linear	0,79	0,12	0,36	2	0,87	0,09	0,57
	Inverno	Linear	0,75	0,14	0,22	2	0,89	0,10	0,59
	Anual	Linear	0,76	0,13	0,33	2	0,86	0,11	0,57
Salvador-BA	Primavera	Linear	0,78	0,19	0,61	1	0,79	0,19	0,62
	Verão	Linear	0,79	0,21	0,58	1	0,83	0,19	0,64
	Outono	Linear	0,68	0,17	0,15	1	0,75	0,16	0,29
	Inverno	Linear	0,69	0,17	0,20	1	0,75	0,16	0,35
	Anual	Linear	0,76	0,19	0,52	1	0,79	0,18	0,58

<sup>(1)</sup>  $r$  – Coeficiente de correlação (adimensional); <sup>(2)</sup>  $RMSE$  – Raiz quadrada do erro quadrado médio ( $\text{mm h}^{-1}$ ); e, <sup>(3)</sup>  $NSE$  – Eficiência de Nash-Sutcliffe (adimensional).

Após o ajuste do descompasso (Tabela 4 e Figuras 1), obteve-se valores  $RMSE \leq 0,19$   $\text{mm h}^{-1}$  e as correlações mais estreitas ( $0,91 < r < 0,75$ ). Santos et al. (2021b) também observou melhoria nos indicadores estatísticos na estimativa da  $ET_o$  horária quando realizou a correção do descompasso entre os modelos *MJS* e *ASCE*. Tegos et al. (2017) citam que valores de  $NSE$  inferiores a 0,5 indicam baixa capacidade preditiva do modelo. Portanto,

mesmo com a correção do descompasso muitos valores ainda ficaram abaixo desse limite (Tabela 4).

Na Figura 1a encontram-se as tendências horárias das  $ET_o$  estimadas com os modelos  $ASCE$  e  $MJS$ , antes e após o ajuste do descompasso, na estação meteorológica de Belém-PA. O ajuste do descompasso necessário em Belém-PA foi de uma hora, sendo igual para as demais estações meteorológicas analisadas (Tabela 4). Com exceção de Itacoatiara-AM, que necessitou de duas horas de ajuste.

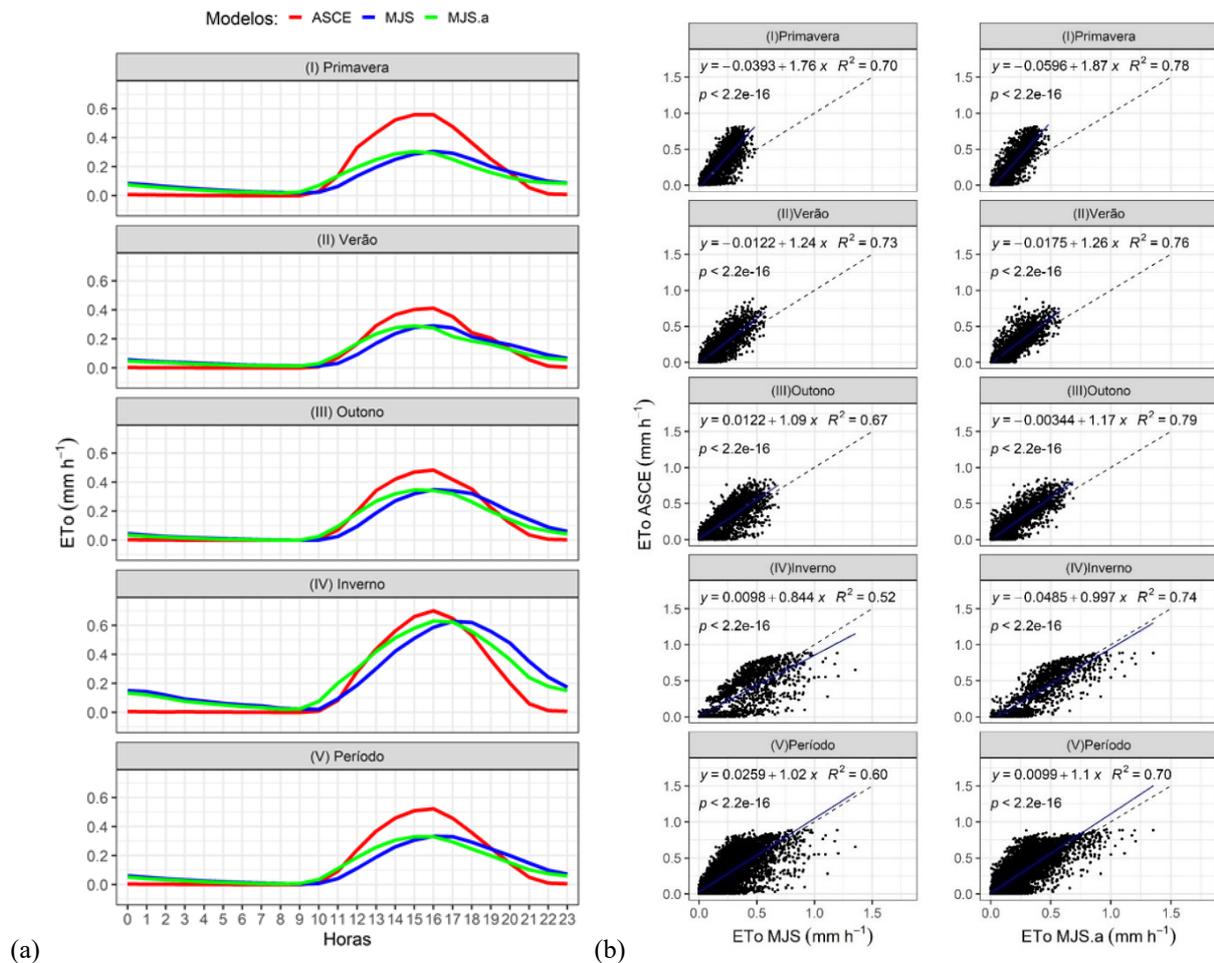


Figura 1 – Análises da estação meteorológica de Belém-PA, para o clima Af, sendo: a) Tendência horária da  $ET_o$  dos modelos  $ASCE$  e Moretti-Jerszurk-Silva linear, antes ( $MJS$ ) e após ajuste do descompasso ( $MJS.a$ ); e, b) Análise de regressão linear entre  $ET_o$  horárias estimadas com os modelos  $ASCE$  ( $ET_{oASCE}$ ) padrão e Moretti-Jerszurk-Silva, antes ( $ET_{oMJS}$ ) e após ( $ET_{oMJS.a}$ ) o ajuste do descompasso.

Apesar dos baixos valores do  $NSE$ , bons resultados foram encontrado para os demais indicadores ( $r$  e  $RMSE$ ) que avaliaram a  $ET_o$  horária estimada com o modelo  $MJS.a$  linear. Neste contexto, acredita-se que o modelo  $MJS.a$  seja uma boa alternativa para ser utilizado somente quanto as variáveis climáticas do modelo  $ASCE$  padrão não estiverem disponíveis nas localidades de clima Af.

## CONCLUSÕES

- Os coeficientes lineares e quadráticos do modelo Moretti-Jerszurk-Silva (*MJS*), calibrados nas associações “ $\Psi_{ar}$  vs  $ET_{OASCE}$ ”, indicaram estatisticamente a possibilidade de realizar a sua validação nas associações “ $ET_{OMJS(\Psi_{ar})Q,h}$  vs  $ET_{OASCE}$ ” e “ $ET_{OMJS(\Psi_{ar})L,h}$  vs  $ET_{OASCE}$ ”, para o clima *Af*. Nas validações, o modelo *MJS* linear mostrou-se estatisticamente e operacionalmente mais indicado para a realização das estimativas de *ET<sub>o</sub>* horária na localidade do clima *Af*.
- Os coeficientes “*a*” e “*b*” do *MJS* linear para as localidade do clima *Af* ficaram entre  $-9,31E-02$  e  $-5,32E-02$  e entre  $-8,13E-08$  e  $-7,03E-08$ , respectivamente.
- A correção do descompasso de uma hora entre os valores de *ET<sub>o</sub>* estimados com o *MJS.a* em relação ao *ASCE* melhorou significativamente os indicadores que avaliaram as associações “ $ET_{OMJS(\Psi_{ar})L,h}$  vs  $ET_{OASCE}$ ”. Mesmo assim, devido aos baixos *NSE*, o modelo *MJS.a* linear horário é uma alternativa adequada somente quanto as variáveis climáticas necessárias ao modelo *ASCE* padrão não estiverem disponíveis nas localidades de clima *Af*.

## REFERÊNCIAS

- ASCE-EWRI. The ASCE standardized reference evapotranspiration equation. Report of the Task Committee on Standardization of Reference Evapotranspiration. Reston: **Institute of the American Society of Civil Engineers**; 2005.
- JERSZURKI, D.; SOUZA, J. L. M.; SILVA, L. C. R. Expanding the geography of evapotranspiration: An improved method to quantify land-to-air water fluxes in tropical and subtropical regions. **PLOS ONE**, v.12, n.6, 2017. DOI:10.1371/journal.pone.0180055.
- NASA - National Aeronautics and Space Administration. Simple Linear Regression and Correlation. p. 401-512. 2009. Disponível em: <<http://www.leg.ufpr.br/~walmes/ensino/ce071-2014-01/cap11e12.pdf>> Acesso em 18 de fevereiro de 2024.
- OLIVEIRA, S. R. Ajuste do método Moretti-Jerszurki-Silva para estimar a evapotranspiração de referência diária e horária dos tipos climáticos brasileiros. **Tese (Doutorado)** - Universidade Federal do Paraná. Setor de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo. Curitiba. 2018. Disponível em: <[http://www.moretti.agrarias.ufpr.br/publicacoes/tese\\_2018\\_oliveira\\_s\\_r.pdf](http://www.moretti.agrarias.ufpr.br/publicacoes/tese_2018_oliveira_s_r.pdf)>. Acesso em 18 de fevereiro de 2024.
- PAREDES, P.; PEREIRA, L. S.; ALMOROX, J.; DAROUICH, H. Reference grass evapotranspiration with reduced data sets: Parameterization of the FAO Penman-Monteith temperature approach and the Hargeaves- Samani equation using local climatic variables. **Agricultural Water Management**. v. 240, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106210>
- RStudio Team. **RStudio: Integrated Development for R**. RStudio, PBC, Boston, MA. 2023. URL: <<http://www.rstudio.com/>>.
- ROSA, S. L. K. Alternativas para utilização e otimização do método ASCE Penman-Monteith na ausência de dados em quantidade e qualidade. **Tese (Doutorado em Ciência do Solo)**. 151p. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2023. Disponível em: <[http://www.moretti.agrarias.ufpr.br/publicacoes/tese\\_2023\\_rosa\\_s\\_l\\_k.pdf](http://www.moretti.agrarias.ufpr.br/publicacoes/tese_2023_rosa_s_l_k.pdf)>. Acesso em 16 de abril de 2023.

SANTOS, A. A.; SOUZA, J. L. M.; ROSA, S. L. K. Hourly and Daily Reference Evapotranspiration with ASCE-PM Model for Paraná State, Brazil. **Revista Brasileira de Meteorologia**. 2021a. ISSN 1982-4351. DOI: <https://doi.org/10.1590/0102-77863610009>

SANTOS, A. A.; SOUZA, J. L. M.; ROSA, S. L. K. Evapotranspiration with the Moretti-Jerszurki-Silva model for the Brazilian sub-tropical climate. **Hydrological Sciences Journal**, v. 66, n. 16, p. 1-13, 2021b. DOI: <https://doi.org/10.1080/02626667.2021.1988610>

SOUZA, J. L. M.; OLIVEIRA, S. R. ROSA, S. L.; JERSZURKI, D. Hourly reference evapotranspiration by Moretti-Jerszurki-Silva method using data from alternative station. **Brazilian Journal of Agricultural and Environmental Engineering**. v.25, n.8, p.505-513. 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v25n8p505-513>

SUBEDI, A.; CHÁVEZ, J. L.; ANDALES, A. A. Hourly Alfalfa Evapotranspiration Estimation Using Variable Bulk Surface Resistance. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v. 10, 2019. 12p.

TEGOS, A.; MALAMOS, N.; EFSTRATIADIS, A.; TSOUKALAS, I.; KARANASIOS, A.; KOUTSOYIANNIS, D. Parametric Modelling of Potential Evapotranspiration: A Global Survey. **Water**, 9 (795), p.1-22, 2017. DOI: 10.3390/w9100795

TRAN, A. P.; RUNGEE, J.; FAYBISHENKO, B.; DAFFLON, B.; HUBBARD, S. S. Assessment of Spatiotemporal Variability of Evapotranspiration and Its Governing Factors in a Mountainous Watershed. *Water* v. 11, 2019, 11, 17p.

WICKHAM, H.; CHANG, W.; HENRY, L.; PEDERSEN, T. L.; TAKAHASHI, K.; WILKE, C.; WOO, K.; YUTANI, H.; DUNNINGTON, D. **Ggplot2: Create Elegant Data Visualizations Using the Grammar of Graphics**. R em interface RStudio, PBC, Boston, MA. 2022. URL: <https://ggplot2.tidyverse.org/>