

**SENSIBILIDADE SAZONAL PARA VARIÁVEIS CLIMÁTICAS DO
MODELO MORETTI-JERSZURKI-SILVA EM CLIMA SEMIÁRIDO BRASILEIRO**

OLIVEIRA S.R.¹; SOUZA J.L.M.²; JERSZURKI D.⁴, BARROCA, M.V.¹;
SANTOS A.A.¹

¹Pós-Graduação em Ciência do Solo, UFPR; ²Professor do Departamento de Solos e Engenharia Agrícola, UFPR, e-mail: jmoretti@ufpr.br; ³Pesquisadora, Ben-Gurion University of the Negev, Jacob Blaustein Institutes for Desert Research

RESUMO

A análise de sensibilidade é uma importante ferramenta na avaliação do impacto das variáveis climáticas na evapotranspiração de referência estimada. Teve-se por objetivo no presente trabalho analisar a sensibilidade do modelo de estimativa da evapotranspiração de referência Moretti-Jerszurki-Silva (ET_{OMJS}) às variáveis déficit de pressão de vapor (DPV) e temperatura média do ar sob condições de clima semiárido brasileiro. Foram utilizados dados horários da estação meteorológica Petrolina - A307, compreendidos entre os períodos de 1994 a 2014, para estimativa da ET_o . Os coeficientes de sensibilidade foram derivados para cada variável na base diária e posteriormente foi extraída a média mensal. As mudanças na ET_{OMJS} foram linearmente relacionadas às alterações nas variáveis climáticas, apresentando $R^2 > 0,99$ nos casos avaliados. Os resultados demonstraram a variabilidade dos coeficientes de sensibilidade nos períodos mensais. A ET_{OMJS} foi mais sensível às alterações no DPV durante todos os meses, com destaque para os meses de maio a julho (inverno). O coeficiente de sensibilidade para temperatura média foi maior entre os meses de setembro a fevereiro (primavera-verão) e menores durante o inverno.

Palavras-chave: evapotranspiração de referência; análise de sensibilidade; calibração; validação.

INTRODUÇÃO

A análise de sensibilidade na estimativa da evapotranspiração é um procedimento utilizado quando se deseja obter respostas à tendência sazonal (Bakhtiari et al., 2011; Pattle e Singh, 2015) ou regional (Hou et al., 2013; Yang et al., 2013) da evapotranspiração, ao se alterar as variáveis climáticas presentes no método de estimativa, como os modelos Penman-Monteith, Makkink, Hargreaves (Irmak et al., 2006; Hosseine et al., 2013; Ambas e Baltas, 2012).

A avaliação da sensibilidade das variáveis dos modelos de estimativa da evapotranspiração permite identificar a importância de cada variável no processo, seja ela climática ou fisiológica. Saxton (1975) concluiu que a radiação líquida foi a variável mais sensível quando aplicada a equação Penman. Bakhtiari et al. (2011) verificaram que a evapotranspiração de referência foi mais sensível ao déficit de pressão de vapor (*DPI*) e velocidade do vento, quando estimada pelo modelo Penman-Monteith. Ambas e Baltas (2012) verificaram variações nos coeficientes de sensibilidade quando se realizou avaliações mensais para modelos distintos. Os autores ressaltam que os coeficientes apresentaram sensibilidade às variações sazonais, bem como nos períodos em que foram realizadas irrigações, conforme verificado para o mês de julho, no qual ocorreu maior demanda hídrica e ocorrência de alterações nos coeficientes quando houve o fornecimento de água, alterando o microclima. Os cinco métodos utilizados pelos autores demonstraram que radiação e temperatura foram as variáveis que apresentaram efeitos mais pronunciados na evapotranspiração. Goyal (2004) encontraram velocidade do vento como a variável mais sensível quando aplicada ao modelo Penman-Monteith na Índia.

Embora comumente aplicado ao modelo Penman-Monteith, a análise de sensibilidade pode ser utilizada para avaliar alterações que ocorrem na evapotranspiração a partir de qualquer modelo de estimativa. No presente estudo, foi realizada a análise de sensibilidade da evapotranspiração de referência estimada com o modelo Moretti-Jerszurki-Silva (*ET_{OMJS}*), em Petrolina-PE, no semiárido brasileiro.

MATERIAIS E METODOS

Descrição dos dados e caracterização ambiental

Os dados foram extraídos da estação automática Petrolina-A307, localizada no Estado de Pernambuco, nas coordenadas $-9,38^\circ$ S de latitude, $-40,52^\circ$ W de longitude e 373 metros de altitude acima do nível do mar. O clima da área é classificado como BSh, semiárido, com precipitação média anual de 486,3 mm, de acordo com as normais climatológicas (1961 a 1990). Demais variáveis climáticas do local encontram-se apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Normais climatológicas das variáveis climáticas (1961 a 1990) para a estação Petrolina-A307

Variável	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	D.P.	C.V.
<i>T_{min}</i>	22,3	22,3	22,2	22,0	21,1	20,2	19,5	19,7	20,7	22,1	22,7	22,5	1,01	4,67
<i>T_{max}</i>	33,7	32,9	33,6	32,1	30,9	30,4	30,5	31,5	32,5	33,8	34,0	33,8	1,16	3,57
<i>UR</i>	58,0	63,0	67,0	70,0	64,0	61,0	60,0	53,0	48,0	48,0	50,0	54,0	6,16	10,63
<i>DPV</i>	1,87	1,69	1,56	1,55	1,49	1,37	1,37	1,61	1,98	2,26	2,20	2,03	0,31	17,83
<i>Rs</i>	20,27	20,28	19,53	16,67	14,93	14,22	15,00	17,19	19,64	20,74	20,53	20,06	2,48	13,61
<i>u₂</i>	3,17	3,00	3,04	3,30	4,29	4,77	4,99	5,28	5,06	4,24	3,64	3,30	0,76	19,07
<i>P</i>	81,9	105,9	136,3	93,6	21,7	5,1	8,7	2,4	5,6	11,9	53,5	50,8	38,88	6,73

T_{min} – temperatura mínima (°C); *T_{max}* – temperatura máxima (°C); *UR* – umidade relativa (%); *DPV* – déficit de pressão de vapor (kPa); *Rs* – radiação solar (MJ m⁻² dia⁻¹); *u₂* – velocidade do vento (m s⁻¹); *P* – precipitação (mm); *D.P.* – desvio padrão; *C.V.* – coeficiente de variação.

Evapotranspiração de referência diária (*ET_o*)

A estimativa da evapotranspiração de referência diária, considerada padrão, foi realizada a partir da equação padronizada Penman-Monteith, apresentada por *American Society of Civil Engineers* (ASCE EWRI, 2005). Os valores obtidos são fundamentais nas análises de calibração de modelos alternativos de estimativa da *ET_o*.

$$ET_{oPM} = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \frac{C_n}{(T + 273)} \cdot u_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + C_d \cdot u_2)} \quad (1)$$

Sendo: *ET_{oPM}* – evapotranspiração de referência (mm d⁻¹); Δ – declividade da curva de pressão de vapor da água à temperatura do ar (kPa °C⁻¹); *R_n* – radiação líquida na superfície (MJ m⁻² d⁻¹); *G* – balanço do fluxo de calor no solo (MJ m⁻² d⁻¹); γ – constante psicrométrica (kPa °C⁻¹); *T* – temperatura média do ar (°C); *u₂* – velocidade do vento a dois metros de altura (m s⁻¹); *e_s* – pressão de saturação de vapor (kPa); *e_a* – pressão atual do vapor (kPa); *C_n* – constante relacionada ao tipo de vegetação e escala de tempo, sendo considerado igual a 900 para grama curta (adimensional); *C_d* – constante relacionada ao tipo de vegetação e escala de tempo, sendo considerado igual a 0,34 para grama curta (adimensional).

A evapotranspiração de referência estimada a partir do modelo Moretti-Jerszurki-Silva (*ET_{oMJS}*) baseou-se na utilização do potencial hídrico atmosférico (ψ_{ar}). As variáveis de entrada do modelo, temperatura do ar e umidade relativa, foram obtidas para os anos de 2013 e 2014.

$$ET_{oMJS} = a + b \cdot (\psi_{ar}) \quad (2)$$

Sendo: *ET_{oMJS}* – evapotranspiração de referência estimada com o modelo *MJS*(ψ_{ar}) (mm dia⁻¹); ψ_{ar} – potencial hídrico atmosférico diário (MPa); *a* – coeficiente linear da equação de regressão, obtido da relação ψ_{ar} vs *ET_{oPM}* (mm dia⁻¹); *b* – coeficiente angular da equação de regressão, obtido da relação ψ_{ar} vs *ET_{oPM}* (adimensional).

$$\psi_{ar} = \frac{R \cdot T}{M_v} \cdot \ln \frac{e_a}{e_s} \quad (3)$$

Sendo: ψ_{ar} – potencial hídrico atmosférico (MPa); R – constante universal dos gases perfeitos ($8,314 \text{ J mol}^{-1} \text{ K}^{-1}$); M_v – massa molar da água ($18 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ mol}^{-1}$); T – temperatura média do ar (K); e_a – pressão atual de vapor (MPa); e_s – pressão de saturação de vapor (MPa).

Os coeficientes a e b utilizados foram estimados durante a etapa prévia de calibração, utilizando dados do período compreendido entre 1994 e 2012, a partir da regressão estabelecida entre o potencial hídrico do ar e o modelo Penman-Monteith (ASCE-EWRI, 2005). Maiores detalhes da etapa de calibração podem ser encontrados em Jerszurki et al (2017).

Análise de sensibilidade

A análise de sensibilidade investiga os efeitos de mudança de um fator a partir de outro (McCuen, 1974), mantendo os demais constantes. O coeficiente de sensibilidade para cada variável climática foi derivado dividindo a quantidade de aumento ou diminuição de ET_o pela unidade de aumento ou diminuição em cada variável climática diariamente (Irmak et al., 2006):

$$CS = \frac{\Delta ET_o}{\Delta VC} \quad (4)$$

Sendo: CS – coeficiente de sensibilidade (adimensional); ΔET_o – variação na evapotranspiração de referência (mm dia^{-1}); ΔVC – variação na variável climática em questão (unidade da variável).

O coeficiente de sensibilidade (CS) foi calculado a partir dos valores diários dos dois anos analisados (2013 e 2014), para cada variável climática. Assim, cada coeficiente de sensibilidade mensal é resultado da média dos coeficientes de sensibilidade diários para cada parâmetro. Assim, para determinar o CS para o déficit de pressão de vapor (DPV), os acréscimos/decréscimos na ET_{OMJS} referentes aos acréscimos/decréscimos no DPV ($\pm 0,4 \text{ kPa}$, $\pm 0,8 \text{ kPa}$, $\pm 1,2 \text{ kPa}$, $\pm 1,8 \text{ kPa}$ e $\pm 2,0 \text{ kPa}$) foram calculados como as diferenças entre a ET_o e o “novo” valor de ET_o , para cada dia. A diferença entre a ET_{OMJS} calculada (com o acréscimo/decréscimo) e a ET_{OMJS} base foi dividida pela alteração do DPV . Da mesma forma foi definido o CS para temperatura média, com os acréscimos/decréscimos de $\pm 1^\circ\text{C}$, $\pm 2^\circ\text{C}$, $\pm 3^\circ\text{C}$, $\pm 4^\circ\text{C}$ e $\pm 5^\circ\text{C}$.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os coeficientes (angular e linear) obtidos durante a etapa de calibração, bem como o coeficiente de determinação encontram-se apresentados na Tabela 2, para cada período mensal.

Tabela 2. Parâmetros de ajustes mensais da etapa de calibração para o modelo Moretti-Jerszurki-Silva.

Mês	<i>A</i>	<i>b</i>	R ²	Mês	<i>a</i>	<i>b</i>	R ²
Janeiro	2,668	- 0,036	0,790	Julho	2,306	- 0,032	0,667
Fevereiro	2,581	- 0,038	0,771	Agosto	2,892	- 0,030	0,619
Março	2,337	- 0,039	0,814	Setembro	3,601	- 0,027	0,544
Abril	2,130	- 0,038	0,804	Outubro	3,433	- 0,030	0,564
Maiο	2,204	- 0,034	0,723	Novembro	3,147	- 0,032	0,715
Junho	2,171	- 0,033	0,712	Dezembro	2,846	- 0,034	0,747

a – coeficiente linear; *b* – coeficiente angular; R² – coeficiente de determinação

As mudanças aplicadas em cada variável climática resultaram em tendência linear com as alterações relativas à ET_{OMJS} , apresentando valores para o coeficiente de correlação superiores a 0,99 para as variáveis durante os períodos mensais. Verificou-se que os acréscimos e decréscimos nas alterações das variáveis *DPV* e *Tmed* resultaram em tendência oposta em relação à variação da ET_{OMJS} .

Durante todo o ano, a ET_{OMJS} apresentou maior sensibilidade ao *DPV* em detrimento à temperatura média (Figura 1). A mudança de ± 2 kPa no *DPV* resultou em alteração de $\pm 3,88$ mm dia⁻¹ na ET_{OMJS} para o período anual, com destaque para a alteração de $\pm 4,09$ mm dia⁻¹ para o mês de julho (Figura 1c). A tendência para a temperatura média apresentou aspectos distintos, resultando para o mês de julho alteração de $\pm 0,13$ mm dia⁻¹ quando a mudança na variável foi de ± 3 °C. As alterações na temperatura resultaram em menores efeitos durante as estações outono, quando comparada às demais, devido à redução da temperatura média associada às chuvas presentes no período.

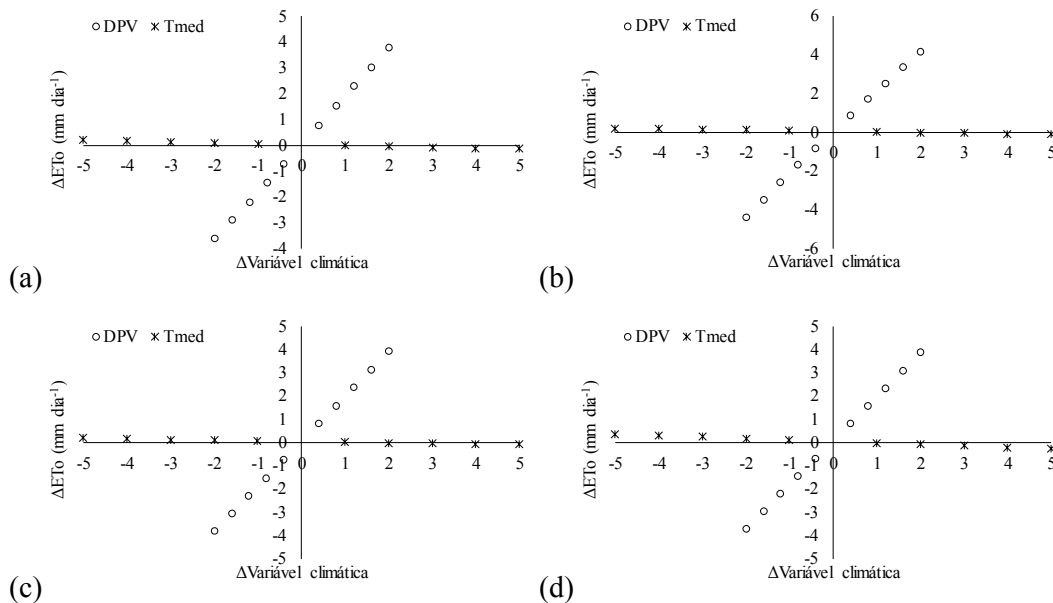


Figura 1 – Alterações na variação da ET_{OMJS} com os acréscimos ou decréscimos nas variáveis temperatura média e déficit de pressão de vapor, durante os meses: (a) fevereiro; (b) maio; (c) julho; e, (d) outubro.

A variação entre os períodos estacionais foi validada pelos coeficientes de sensibilidade apresentados na Tabela 3. Verificou-se que durante os meses de março a abril (outono) obteve-se menores coeficientes de sensibilidade, em termos absolutos, resultando nas menores variações da ET_{OMJS} para o período. As variações na ET_{OMJS} foram de 0,10 a 0,15 mm dia⁻¹, em abril (inverno) e fevereiro (verão), respectivamente. Estevez et al. (2009) verificaram que os CS para as variáveis climáticas avaliadas para o modelo de Penman-Monteith apresentaram flutuações durante o ano, principalmente para as variáveis temperatura e umidade relativa, com maiores valores verificados em agosto e dezembro, respectivamente. Pattle e Singh (2015), avaliando o CS para períodos estacionais, observaram para o verão que a ET_o foi mais influenciada pela temperatura mínima e umidade relativa, enquanto no inverno foi mais influenciada pela temperatura máxima.

Tabela 2. Média dos coeficientes de sensibilidade para as variáveis temperatura média (T_{med}) e déficit de pressão de vapor (DPV)

Variável	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.
T_{med}	-0,042	-0,032	-0,026	-0,026	-0,027	-0,027	-0,029	-0,040	-0,054	-0,061	-0,057	-0,046
DPV	1,864	1,881	1,900	1,892	1,946	2,021	2,068	2,051	1,982	1,903	1,874	1,856

A variação anual da ET_{OMJS} conforme as alterações das variáveis podem ser visualizadas na Figura 2. Para o DPV verificou-se que mudanças de $\pm 0,4$ kPa apresentam suaves alterações durante todo o ano. Mudanças a partir de $\pm 1,2$ kPa refletiram em alterações mais significativas, principalmente durante os meses de maio a agosto (2,32; 2,41; 2,47 e 2,48 mm dia⁻¹). No período outono-inverno, a influência do DPV , que representa a umidade relativa, converge com os menores valores de umidade para o período, conforme pode ser visualizado na Tabela 1, com maiores valores no CS para períodos com menor volume de chuva. Para a variável temperatura verificou-se tendência oposta, no qual durante o período outono inverno as mudanças de ± 1 °C não apresentaram variações significativas na ET_{OMJS} . No entanto, no período primavera-verão foram verificadas alterações de até $\pm 0,33$ mm dia⁻¹, quando o incremento foi de ± 5 °C, e no período outono-inverno foi inferior a $\pm 0,15$ mm dia⁻¹. A variação observada durante o ano permite melhor planejamento do uso de recursos hídricos, como a adequação do fornecimento de água em projetos de irrigação a partir do conhecimento do incremento da evapotranspiração em períodos de maior temperatura.

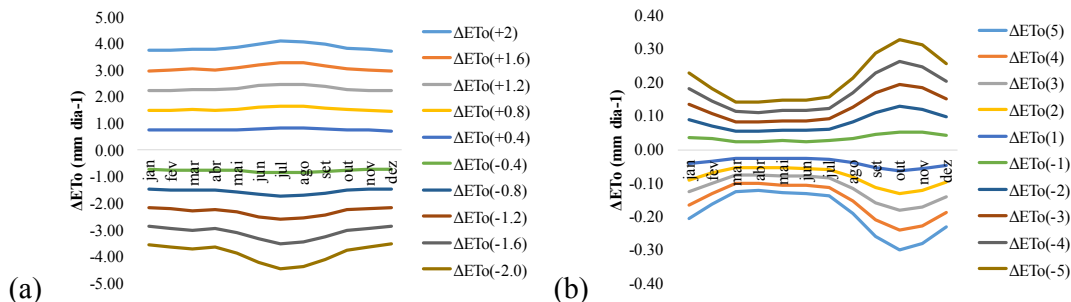


Figura 2 –. Variação mensal da ET_{OMJS} para as variáveis climáticas: (a) DPV ; e, (b) temperatura média.

CONCLUSÕES

A análise de sensibilidade demonstrou que as mudanças da evapotranspiração de referência para o modelo Moretti-Jerszurki-Silva foram mais sensíveis ao déficit de pressão de vapor, principalmente para o período estacional inverno (junho a agosto);

As alterações na temperatura apresentaram menores efeitos na evapotranspiração de referência, sendo mais sensível à variação sazonal.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

AMBAS VT, BALTAS E. Sensitivity analysis of different evapotranspiration methods using a new sensitivity coefficient. *Global NEST Journal*. 2012; 14: 335–343.

ASCE-EWRI. The ASCE standardized reference evapotranspiration equation. Report 0-7844-0805-X, ASCE Task Committee on Standardization of Reference Evapotranspiration. American Soc. Civil Engineers. 2005.

BAKHTIARI B, LIAGHAT AM. Seasonal sensitivity analysis for climatic variables of ASCE-Penman-Monteith model in a semi-arid climate. *Journal of Agricultural Science Technology*. 2011; 13: 1135-1145.

ESTEVEZ J, GAVILLAN P, BERENGENA J. Sensitivity analysis of a Penman–Monteith type equation to estimate reference evapotranspiration in southern Spain. *Hydrological Process*. 2009; DOI: 10.1002/hyp.

GOYAL R. Sensitivity of evapotranspiration to global warming: A case study of arid zone of Rajasthan (India). *Agricultural Water Management*. 2004; 69: 1-11.

HOSSEINE S, JAFARI J, GHORBAL M. Sensitivity of the FAO-Penman Monteith reference evapotranspiration equation to change in climatic variables in the north-western Iran. *Research in Civil and Environmental Engineering*. 2013; 1: 28-40.

HOU L, ZOU S, XIAO H, YANG Y. Sensitivity of reference evapotranspiration to key climatic variables during the growing season in the Ejina oasis northwest China. *Springer Plus* 2013; 2: 1-6.

IRMAK S, PAYERO JO, MARTIN DL, IRMAK A, HOWELL TA. Sensitivity analyses and sensitivity coefficients of standardized daily ASCE-Penman-Monteith equation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 2006; 132: 564-578.

JERSZURKI D, SOUZA JLM, SILVA LCR. Expanding the geography of evapotranspiration: An improved method to quantify land-to-air water fluxes in tropical and subtropical regions. *Plos One*. 2017; 6: e0180055.

McCUEN. A sensitivity and error analysis of procedures used for estimating evaporation. *Journal of the American Water Resources Association*. 1974; 10: 486-497.

PATTLE GT, SINGH DK. Sensitivity of annual and seasonal reference crop evapotranspiration to principal climatic variables. *Journal Earth System Science*. 2015; 4:819 – 828.

SAXTON KE. Sensitivity analysis of the combination evapotranspiration equation. *Agricultural and Meteorology*. 1975; 15: 343-353.

YANG J, LIU Q, MEI X, YAN C, JU H, XU J. Spatiotemporal characteristics of reference evapotranspiration and its sensitivity coefficients to climate factors in Huang-Huai-Hai Plain, China. *Journal of Integrative Agricultural*. 2013; 12: 2280-2291.