



Análise espacial da influência dos elementos meteorológicos sobre a evapotranspiração de referência em Minas Gerais¹

Luis C. A. Lemos Filho², Luiz G. Carvalho², Adão W. P. Evangelista³ & José Alves Júnior³

RESUMO

Comumente, as metodologias utilizadas e recomendadas para estimar o requerimento d'água pelas plantas são baseadas em elementos meteorológicos, razão por que o objetivo deste trabalho foi analisar a influência dos elementos meteorológicos na estimativa da evapotranspiração de referência (ET_0) no estado de Minas Gerais. Os valores de ET_0 foram estimados pelo método de Penman-Monteith-FAO, a partir de dados diários, referentes a um período de 17 anos. A influência de cada elemento meteorológico no valor da ET_0 foi determinada por testes de sensibilidade e por análises em mapas interpolados para cada elemento. Observou-se nos resultados que, em geral, a ET_0 foi bastante variável em Minas Gerais chegando a apresentar valores médios anuais de 2,51 mm d⁻¹ até valores de 4,59 mm d⁻¹. A análise de sensibilidade revelou que o efeito da variação da maioria dos elementos meteorológicos sobre o valor da ET_0 foi significativo entre as diferentes localidades do estado de Minas Gerais, com destaque para o déficit de pressão de vapor e para a velocidade do vento, além da radiação solar, que foi o elemento meteorológico que mais influenciou a estimativa da ET_0 .

Palavras-chave: meteorologia, variabilidade espaço-temporal, necessidade hídrica

Spatial analysis of the influence of meteorological elements on the reference evapotranspiration in the State of Minas Gerais, Brazil

ABSTRACT

In general the methodologies most used and recommended to estimate crop water requirements are based on meteorological data. The aim of this study was to evaluate the effect of some meteorological elements on reference evapotranspiration (ET_0) estimate in Minas Gerais State, Brazil. The values of ET_0 were estimated daily by the Penman-Monteith-FAO method, using daily data over a period of 17 years. The influence of each meteorological element on ET_0 values was determined by sensitivity tests and interpolated map analysis for each element under study. The results showed that the reference evapotranspiration is very variable in Minas Gerais, with annual average values between 2.51 to 4.59 mm d⁻¹. The sensitivity analysis showed a high variation effect of meteorological elements in ET_0 in Minas Gerais, with high sensitivity to vapor pressure deficit, wind speed and radiation. The radiation was the most important meteorological element, with the highest influence in ET_0 .

Key words: meteorology, spatial-temporal variability, water requirement

¹ Parte da Dissertação de Mestrado do primeiro autor, apresentada à UFLA

² DEG/UFLA, Campus Universitário, CP 3037, CEP 37200-000, Lavras, MG. Fone: (35) 3829-1481. E-mail: lcalfilho@ifce.edu.br; lgonsaga@deg.ufla.br

³ EA/UFG, Campus Samambaia, Rodovia Goiânia/Nova Veneza, Km 0, CP 131, CEP 74690-900, Goiânia, GO. Fone: (62) 3521 1534. E-mail: awpego@bol.com.br; jose.junior@pq.cnpq.br

INTRODUÇÃO

Minas Gerais possui extensas cadeias de montanhas espalhadas por seu território e a influência orográfica nas diferentes condições climáticas do estado é uma realidade constatada estatisticamente por Mello et al. (2007). Sua posição, vegetação e topografia, oferecem condições climáticas diversificadas e excelente potencial hídrico. Segundo a classificação climática de Köppen, em Minas Gerais podem ser encontrados os seguintes tipos climáticos: Aw, BSw, Cwa e Cwb, significando que podem ser encontradas regiões com clima semiárido até regiões com clima tropical chuvoso, com inverno seco (Aspiazu et al., 1990). Além da altitude, Marquínez et al. (2003) mencionam que a continentalidade, expressa pelas coordenadas geográficas, também é variável explicativa de características climáticas quantitativas, como precipitação, temperatura do ar, radiação solar e evapotranspiração.

Os fatores que afetam as taxas de evapotranspiração dos cultivos agrícolas podem ser enquadrados em três categorias: fatores climáticos, fatores da planta e fatores do solo. Em relação aos elementos climáticos, podem ser citados a temperatura do ar, a umidade relativa do ar, a radiação solar, o vento e a chuva, como sendo os principais elementos que afetam a taxa de evapotranspiração. De forma geral, para uma região quanto maior a disponibilidade de energia solar, a temperatura do ar e o vento e quanto menor a umidade relativa do ar, maior deverá ser, também, a taxa de evapotranspiração (Cunha & Escobedo, 2003; Evangelista & Pereira, 2003; Fietz & Fisch, 2009).

Segundo Chang (1968) a radiação solar (R_s) é considerada o elemento climático de maior importância na estimativa da taxa de evapotranspiração; entretanto, em regiões onde ocorrem fortes advecções, seja local ou regional, observadas comumente quando uma área úmida é circundada por área seca, a importância relativa do saldo de radiação decresce e a advecção, ou transferência de calor sensível das áreas secas circunvizinhas, passa a contribuir significativamente no processo de evapotranspiração aumentando, neste processo, a importância da velocidade do vento e da umidade do ar.

Ademais, a taxa de evapotranspiração está diretamente ligada ao déficit de pressão de vapor (DPV). Normalmente, à medida que a temperatura do ar decresce, ocorrem aumento na umidade relativa e queda na evapotranspiração (Medeiros, 2003). Em climas úmidos de regiões tropicais e apesar da elevada quantidade de energia disponível, a alta umidade relativa reduz a evapotranspiração, pois o ar está sempre próximo da saturação e assim a umidade relativa local e a temperatura do ar determinam o déficit de pressão de vapor, que é um indicador da capacidade evaporativa do ar.

Em manejo de irrigação o desenvolvimento de estudos para avaliação de consumo hídrico das culturas agrícolas assume importância fundamental. Segundo Pereira et al. (2002), uma das alternativas mais utilizadas no mundo para verificar o consumo de água pelas plantas é por meio da determinação da evapotranspiração da cultura pelo processo que se desenvolve em duas etapas. Inicialmente, calcula-se a evapotranspiração de referência (ET_0) a partir de elementos meteorológicos e, em seguida, se multiplica o resultado por um coeficiente denominado coeficiente de cultura (K_c) ajustando-se a ET_0 à

evapotranspiração da cultura; contudo, a ET_0 estimada pela equação de Penman-Monteith-FAO se torna, muitas das vezes, limitada, em razão da indisponibilidade de todos os dados necessários para entrada no modelo. Assim, analisar a sensibilidade do modelo para os diversos dados de entrada se torna importante, permitindo avaliar o grau de erro quando se arbitra determinado valor ao dado faltante. Irmak et al. (2006) analisaram os efeitos dos elementos climáticos sobre a ET_0 estimada pela equação de Penman-Monteith-FAO em diversas regiões dos Estados Unidos das Américas com diferentes características climáticas. Em geral, a radiação solar incidente sobre a superfície foi o elemento dominante para locais úmidos no período do verão, comparado ao déficit de pressão de vapor (DPV), sendo o oposto observado no período de inverno, fato atribuído, segundo os autores, à menor disponibilidade de energia no inverno e consequente aumento do DPV. O vento assumiu a segunda ordem de importância, sobretudo em regiões áridas e no verão.

A Organização Meteorológica Mundial (OMM) preconiza que são necessários pelo menos 30 anos de dados climáticos para que se tenha uma confiabilidade na caracterização climática de uma região; entretanto, Irmak et al. (2006) afirmam que, dependendo do estudo, na ausência de séries de dados climáticos extensas séries de dados meteorológicos podem ser utilizadas com o mesmo propósito e servir como base para a estimativa do requerimento d'água pelas plantas.

Diante do exposto, objetivou-se com este trabalho analisar a influência dos elementos meteorológicos sobre a evapotranspiração de referência (ET_0) estimada pela equação de Penman-Monteith-FAO, em Minas Gerais.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado para o estado de Minas Gerais, situado entre os paralelos $14^{\circ} 13' 57''$ e $22^{\circ} 55' 22''$ de latitude Sul e os meridianos de $39^{\circ} 51' 23''$ e $51^{\circ} 02' 45''$ de longitude Oeste.

O banco de dados utilizado no estudo foi coletado pela rede nacional de postos de observações meteorológicas de superfície do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET); são dados diários referentes a um período de 17 anos (1971 a 1988). Este intervalo e número de anos da série foram definidos com base na disponibilidade de dados comuns em todos os postos e segundo relatos de Irmak et al. (2006). Para os postos que apresentaram séries históricas incompletas, foi utilizado o método estatístico da regressão linear simples para o preenchimento de falhas, conforme apresentado por Allen et al. (1998) e, para verificar a homogeneidade dos dados, o da "dupla massa". O método adotado para determinação da ET_0 foi o de Penman-Monteith-FAO, descrito por Allen et al. (1998).

Foram utilizados, no trabalho, 42 postos meteorológicos principais (Figura 1A), ou seja, trinta localizados nas diferentes mesorregiões do estado de Minas Gerais (Figura 1B) e doze postos distribuídos nos estados circunvizinhos, os quais são: Distrito Federal, Goiás, Mato Grosso do Sul, São Paulo, Rio de Janeiro, Espírito Santo e Bahia.

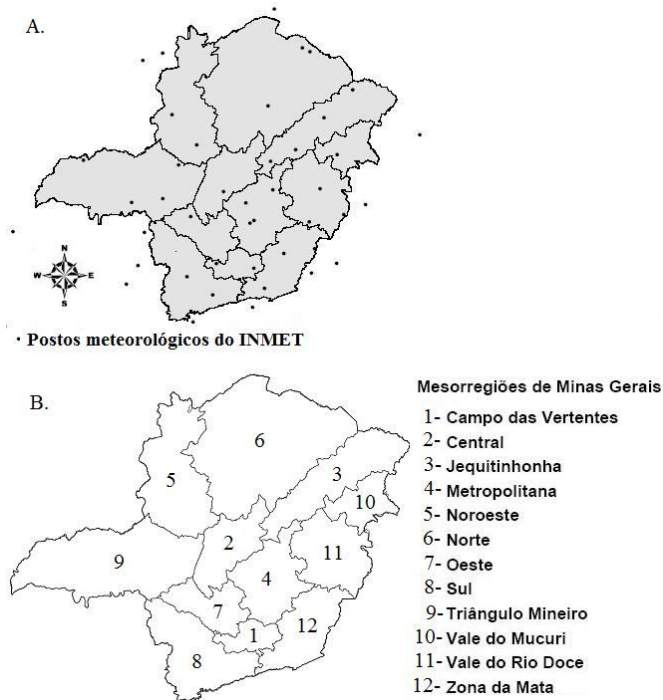


Figura 1. Distribuição dos postos meteorológicos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) (A) e divisões das mesorregiões geográficas, de acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), para o estado de Minas Gerais (B)

Visando verificar o efeito dos elementos de entrada do modelo de Penman-Monteith-FAO sobre os resultados obtidos, realizou-se a análise de sensibilidade do referido modelo para cada microrregião do estado de Minas Gerais, respectivamente para as temperaturas máxima e mínima do ar (T_{max} , T_{min}), para o déficit de pressão de vapor (DPV), para a radiação solar (R_s) e para a velocidade do vento a 2 m da superfície do solo (U_2). Ressalta-se que os dados de velocidade do vento foram medidos a 10 metros da superfície do solo (U_{10}) e posteriormente ajustados para a altura de dois metros utilizando-se a equação de função do vento, descrita por Allen et al. (1998). O procedimento adotado para realização da análise de sensibilidade fundamentou-se no acréscimo ou redução dos valores dos elementos meteorológicos em incrementos de uma até cinco unidades (exceto para déficit de pressão de vapor cujos incrementos foram de 0,4 kPa), enquanto os outros elementos eram mantidos constantes. A adoção de incrementos de 0,4 kPa para DPV, fundamentou-se no fato de que este elemento apresenta menor variação quando comparado com a dos outros elementos analisados. Como o DPV é função da temperatura do ar e da umidade relativa, logo ao incrementar os valores desses elementos promoverá, conseqüentemente, variações no DPV; entretanto, a análise do DPV neste trabalho visou verificar tal dependência nas diferentes localidades do estado de Minas Gerais e épocas do ano pois, segundo Monteith & Unsworth (1990), normalmente o efeito do DPV sobre o valor da ET_0 é menor em regiões e épocas em que ocorrem as menores temperaturas.

Para quantificar o impacto de um intervalo de valores de um parâmetro de entrada sobre os resultados obtidos com o

modelo, foram calculados coeficientes de sensibilidade para a U_2 , T_{max} , T_{min} , DPV e R_s , conforme metodologia descrita por Smajstrla et al. (1987) em que os coeficientes de sensibilidade para cada um dos elementos meteorológicos, foram determinados pela relação entre o acréscimo ou redução do valor da ET_0 e a unidade de acréscimo ou redução do referido elemento, ou seja:

$$C_s = \frac{CH_{ET}}{CH_{EL}} \quad (1)$$

em que:

C_s - coeficiente de sensibilidade;

CH_{ET} - variação do valor da ET_0 com a mudança do elemento meteorológico;

CH_{EL} - acréscimo ou redução do referido elemento meteorológico.

Conforme Smajstrla et al. (1987), o valor de C_s representa a mudança normalizada gerada na saída do modelo para uma mudança normalizada na entrada dos dados, a qual permite comparar a sensibilidade a diferentes magnitudes dos parâmetros de entrada, representando uma função dos parâmetros de entrada para uma resposta não-linear. Quanto maiores (em módulo) forem os índices obtidos mais sensível será o modelo ao parâmetro; já os valores próximos a zero indicam que o modelo não apresenta sensibilidade ao parâmetro.

Com base na metodologia proposta, obteve-se um coeficiente de sensibilidade final para cada elemento meteorológico, resultante da média entre os dez coeficientes obtidos com os 5 incrementos e os 5 decrementos utilizados. O critério para utilização desses incrementos ou decrementos fundamentou-se no fato dos valores limite dos elementos meteorológicos gerados, se aproximarem daqueles de ocorrência na natureza. Para cada região do estado de Minas Gerais obtiveram-se valores de coeficientes de sensibilidade mensais médios de uma série de três anos. A razão para determinação dos coeficientes com base mensal foi avaliar as mudanças sazonais e mensais desses coeficientes, para melhor compreender o efeito relativo de cada elemento meteorológico sobre os valores da ET_0 e, ainda, verificar a variabilidade desses coeficientes em cada localidade do estado de Minas Gerais. Finalmente, para melhor interpretação dos resultados se ajustaram equações lineares simples aos dados que relacionam a variação dos valores de ET_0 (mm) com a variação dos elementos meteorológicos.

Adicionalmente à análise de sensibilidade efetuou-se a espacialização dos elementos meteorológicos para todo o estado de Minas Gerais; para tanto, o conjunto de dados foi georreferenciado por meio das latitudes e longitudes em graus quando, por intermédio de uma planilha eletrônica, se criou um arquivo dBase, contendo as informações X, Y e Z, em que X representa a latitude e Y a longitude da estação e Z o valor da variável a ser espacializada. O modelo matemático de representação da localização das estações na superfície terrestre utilizado no estudo foi o South American Datum 1969 (SAD-69). No estudo da análise de sensibilidade quanto no da

especialização, foram utilizados valores representativos das médias anuais dos respectivos parâmetros em estudo.

O mapa, em formato vetorial, do contorno do estado de Minas Gerais, usado como máscara, foi obtido por meio de importação direta de arquivos disponíveis na página da Internet do Projeto Geominas, de responsabilidade da Secretaria de Estado da Casa Civil do Governo de Minas Gerais, os quais foram gerados em coordenadas Albert e Datum (SAD-69) pela Companhia de Processamento de Dados do Estado de Minas Gerais, (PRODEMG) a partir do mapa geopolítico de Minas Gerais, na escala de 1:1.500.000.

Realizou-se a interpolação para a geração dos mapas através do método do inverso do quadrado da distância (IQD) de acordo com Wei & McGuinness (1973), tomando-se por cada ponto os doze pontos de controle mais próximos, ou seja, postos meteorológicos com valores observados dos elementos meteorológicos avaliados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As distribuições espaciais da média anual diária da evapotranspiração de referência (ET_0), radiação solar incidente sobre a superfície (R_s), da umidade relativa do ar (UR) e da velocidade do vento (U_2) para o estado de Minas Gerais, podem ser visualizadas na Figura 2A a 2D.

Pode-se observar, pela análise dos mapas, que a distribuição espacial dos elementos meteorológicos R_s , UR e U_2 , define o padrão de distribuição espacial da ET_0 e que, de forma geral, quanto maior for a disponibilidade de energia, na forma de R_s , maior U_2 e menor UR, maior taxa de evapotranspiração de referência será observada, resposta já comprovada em diversos trabalhos, conforme citado por Mall & Gupta (2002) e Cunha & Escobedo (2003).

Dentre os elementos meteorológicos o que apresentou a maior variabilidade espacial foi a velocidade do vento (Figura 2D), fato que pode ser explicado pela característica da topografia altamente irregular no estado de Minas Gerais, já que a velocidade do vento, no nível analisado, é um elemento diretamente afetado pelas condições de relevo predominante da superfície terrestre.

Verifica-se, na Figura 2A, que os menores valores das médias anuais diárias de ET_0 foram registrados nas regiões Sul, Campo das Vertentes e Zona da Mata, chegando ao valor de 2,51 mm d^{-1} no extremo sul; observa-se ainda que o valor médio anual da ET_0 diária apresenta tendência crescente a partir da região Noroeste em direção ao Norte, com os maiores valores médios da ET_0 total anual registrados na região Norte, alcançando 4,59 mm d^{-1} no extremo Norte. Na região do Jequitinhonha (Nordeste) e no Norte do estado ocorreram as maiores variações espaciais dos valores de ET_0 ; por outro lado, as regiões do Triângulo e Noroeste apresentaram as menores variações espaciais da ET_0 .

Observando a distribuição espacial da ET_0 (Figura 2A) e comparando-a com a da R_s (Figura 2B), verifica-se que a R_s apresentou distribuição espacial semelhante àquela da ET_0 ; desta forma se constata que a R_s pode ser considerada o elemento meteorológico preponderante sobre o resultado da

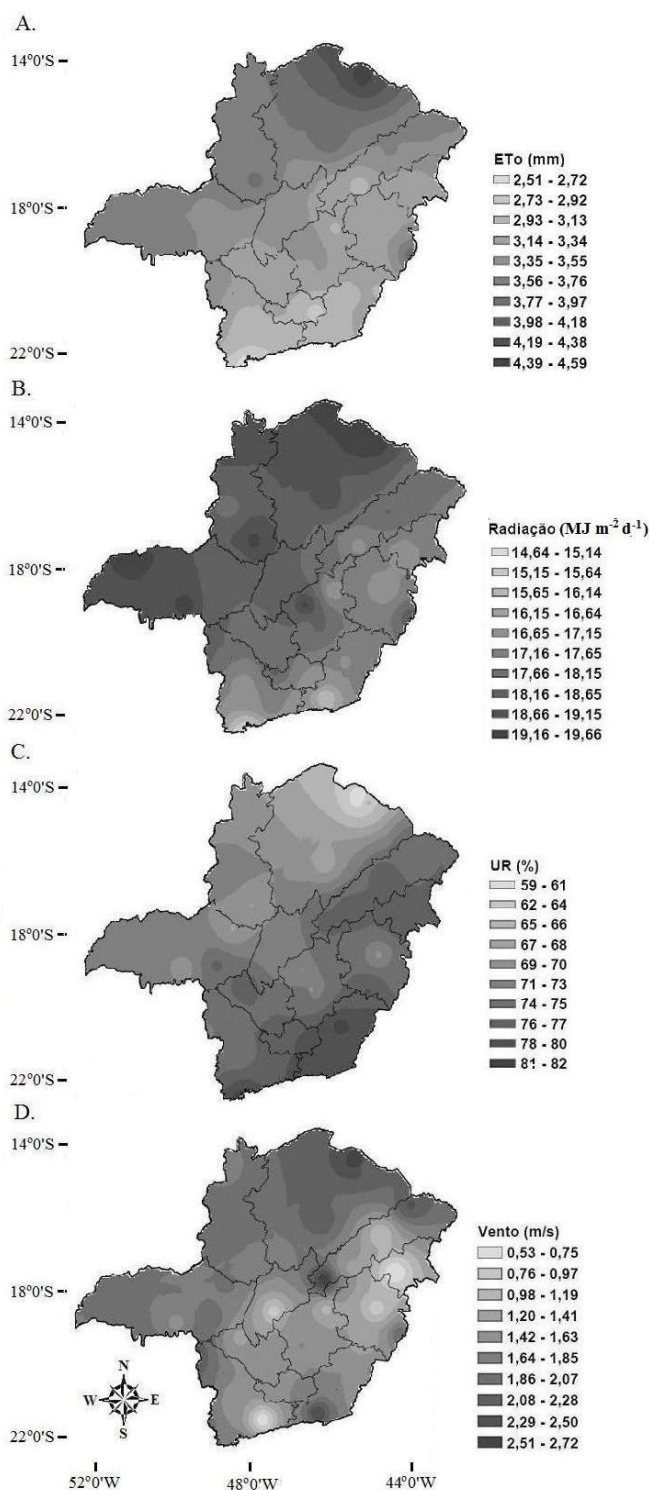


Figura 2. Distribuição espacial da média anual diária da evapotranspiração de referência (A), da radiação solar incidente sobre a superfície (B), da umidade relativa do ar (C) e da velocidade do vento (D), no estado de Minas Gerais

ET_0 . Esses resultados observados estão de acordo com os encontrados por Chang (1968) e Nandagiri & Kovoov (2005), os quais constataram que a R_s é o elemento que mais contribui, em termos quantitativos, no processo da ET_0 . Na Figura 2B também se visualiza que, em geral, as regiões que apresentaram os maiores valores de R_s corresponderam àquelas onde

ocorreram os maiores valores de evapotranspiração de referência (Figura 2A).

Vê-se, na Figura 2B, que os menores valores médios anuais de R_s foram registrados nas regiões Sul e Sudeste (Zona-da-Mata), alcançando o valor de $14,64 \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$ no extremo sul, com comportamento crescente a partir da região Sul em direção às regiões Sudoeste, Noroeste e Norte. Os maiores valores médios anuais de R_s foram registrados nas regiões Norte e Triângulo Mineiro, chegando ao valor máximo de $19,66 \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$ no extremo Norte do estado. A variação espacial de R_s pode ser explicada pela posição geográfica do Estado, com a latitude decrescente no sentido Sul-Norte, além de diferentes condições de nebulosidade e topografia encontradas nas diversas regiões.

Analisando o elemento umidade relativa do ar (Figura 2C), nota-se uma tendência oposta à dos demais elementos meteorológicos analisados, ou seja, locais com registros de maiores valores de umidade relativa do ar (UR) correspondem àqueles onde ocorreram as menores taxas de evapotranspiração de referência (ET_0), cuja ocorrência se deve ao fato de que a umidade relativa de um local determina o déficit de pressão de vapor que é considerado um indicador da capacidade evaporativa do ar.

Na Figura 2D pode ser visualizada a variabilidade espacial da média anual de U_2 no Estado de Minas Gerais e se observar que a distribuição espacial da velocidade do vento foi a que mais diferiu daquela da ET_0 (Figura 2A), indicando que o elemento vento apresentou menor influência no valor da ET_0 quando comparado com os demais elementos. Nota-se, também, que os maiores valores de velocidade do vento foram registrados nas regiões Norte e Nordeste, onde o clima é classificado como semiárido evidenciando, assim, maior intensidade no processo advectivo e, conseqüentemente, no de evapotranspiração. Pode-se inferir que o efeito do vento no Estado de Minas Gerais possui menor influência na ET_0 devido possivelmente ao efeito continentalidade e grande variabilidade da rugosidade da superfície (relevo acidentado). Esses fatores atuam geograficamente como atenuadores da velocidade do vento quando comparado com outras regiões, sobretudo as litorâneas, onde áreas contíguas oceano/continente tornam o efeito do vento mais evidenciado (Silveira & Andrade, 2002; Mendonça & Danni-Oliveira, 2007).

Os efeitos da variação dos elementos de entrada sobre os resultados das simulações obtidos com a aplicação do modelo de Penman-Monteith-FAO podem ser visualizados na Figura 3A a 3L e os coeficientes das equações de regressão ajustadas aos dados que relacionam a variação dos valores de ET_0 com a variação dos elementos meteorológicos, na Tabela 1.

De maneira geral, a resposta da ET_0 às respectivas variações dos elementos meteorológicos foi linear ($R^2 > 0,94$ na maioria dos casos), em todas as regiões estudadas. Como se observa na Figura 3A a 3L, a variação dos elementos meteorológicos promoveu variações sobre o valor da ET_0 entre as diferentes localidades estudadas, com destaque para o déficit de pressão de vapor e para a velocidade do vento. O coeficiente linear das equações de ajuste por regressão representa o efeito da variação do déficit de pressão de vapor sobre o valor da ET_0

sendo maior na região Norte ($a = 0,5045$) e Triângulo Mineiro ($a = 0,4954$) enquanto nas regiões Vale do Mucuri, Centro e Jequitinhonha, a variação deste elemento meteorológico exerceu pouca influência sobre os valores da ET_0 ; no entanto, a variação dos valores de velocidade do vento nas regiões Metropolitana e Zona-da-Mata ($a = 0,4071$ e $a = 0,3822$, respectivamente) exerceu grande influência sobre os valores de ET_0 , quando comparada com as regiões Campos das Vertentes e Vale do Mucuri ($a = 0,1391$ e $a = 0,1553$, respectivamente).

Quanto às temperaturas máxima e mínima do ar, os coeficientes angulares das equações de regressão encontrados foram maiores nas regiões de clima semiárido, como o Triângulo Mineiro, região Oeste e Norte do Estado ($a = 0,0625$; $a = 0,05860$ e $a = 0,0630$, respectivamente), em comparação com os outros locais estudados. Resultados semelhantes obtiveram Monteith & Unsworth (1990), ao encontrarem que o valor da ET_0 é pouco influenciado pela temperatura do ar, quando o DPV permanece constante.

A influência da radiação solar sobre os valores de ET_0 se diferenciou nas diferentes microrregiões estudadas (Figura 3A a 3L). O aumento deste elemento meteorológico nas regiões semiáridas, como o Triângulo Mineiro, Norte e Noroeste, promoveu aumentos consideráveis da ET_0 ; apesar disto, nas regiões Centro e Vale do Mucuri a radiação solar pouco influenciou os valores da ET_0 . Um efeito maior da radiação solar sobre os valores da ET_0 em regiões de clima úmido, era previsto. Segundo Irmak et al. (2006) a contribuição da radiação solar quando comparada àquela da temperatura máxima do ar, no cálculo da ET_0 é maior em regiões de clima úmido, quando ocorrem variações frequentes nos valores de radiação solar em comparação com as variações nos valores de temperatura e umidade relativa do ar.

Pode-se observar, na Figura 3D, que os acréscimos na U_2 resultaram em maiores incrementos da ET_0 na região Metropolitana, quando comparada com as outras regiões. O acréscimo na velocidade do vento acarreta redução na resistência aerodinâmica, resultando em aumento da ET_0 , explicando o efeito da variação da U_2 sobre o valor da ET_0 ; por sua vez, Allen et al. (1998) afirmam que em regiões de clima úmido a alta umidade do ar e a presença de nuvens tornam a taxa de ET_0 mais baixa, condição em que o vento substitui o ar úmido saturado pelo ar não-saturado e, conseqüentemente, remove energia em forma de calor latente; assim, a velocidade do vento afeta a taxa de evapotranspiração em escala menor do que sob condições áridas, em que pequenas variações na velocidade do vento podem resultar em variações maiores na taxa de ET_0 .

A sensibilidade da ET_0 à velocidade do vento em determinados intervalos, não foi linear quando este elemento foi reduzido; por exemplo, nas regiões Norte e Metropolitana (Figura 3D e 3F), quando a U_2 foi aumentada em 1, 2, 3, 4 e 5 m s^{-1} , resultou, em módulo, em menores acréscimos da ET_0 , quando o valor da velocidade do vento foi reduzido na mesma proporção.

Os valores dos coeficientes de sensibilidade (CS) mensal e anual obtidos para cada localidade do estado de Minas Gerais

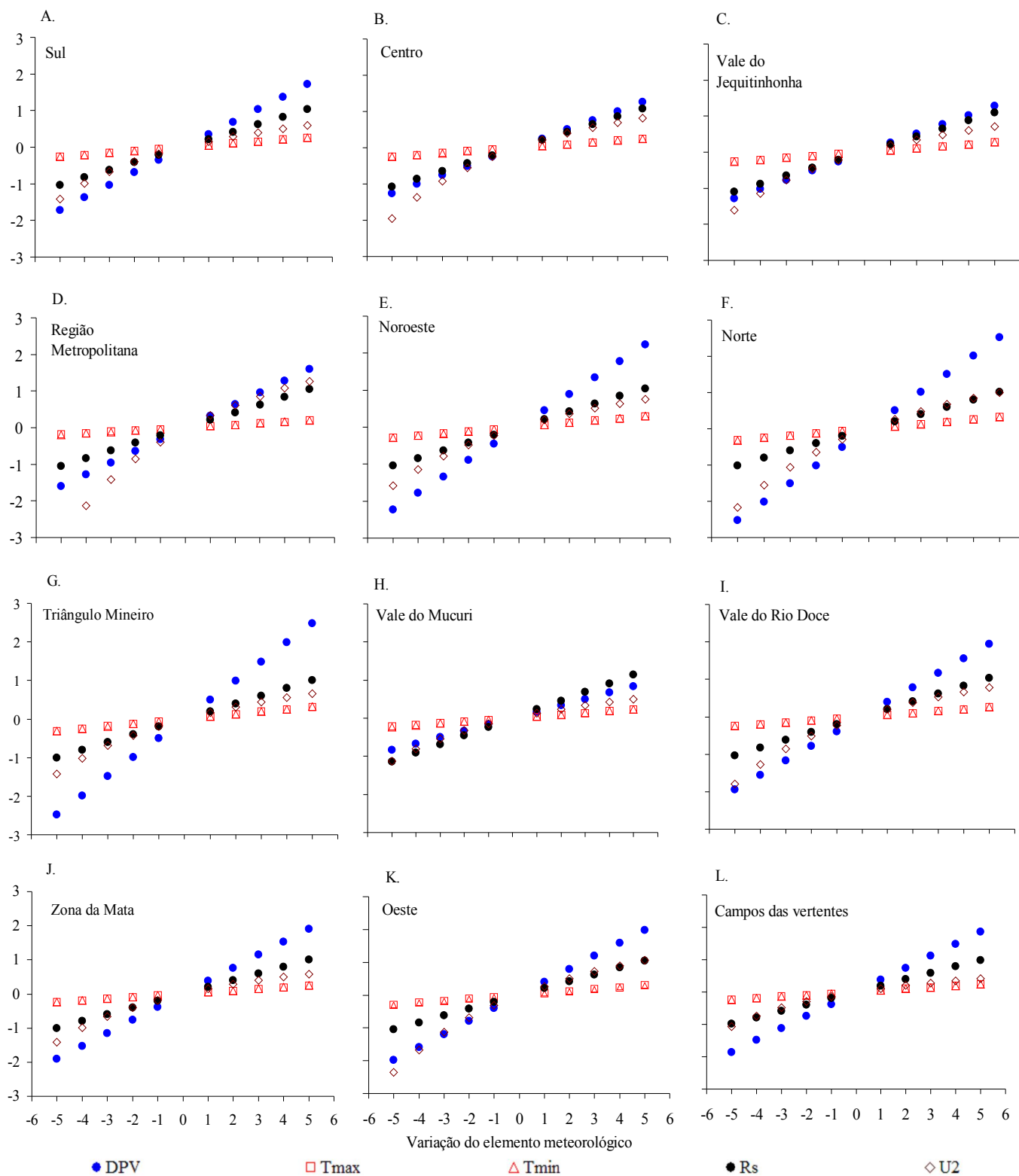


Figura 3. Variação da ET_0 para os respectivos acréscimos ou redução dos elementos meteorológicos, nas regiões: Sul (A); Centro (B); Vale do Jequitinhonha (C); Metropolitana (D); Noroeste (E); Norte (F); Triângulo Mineiro (G); Vale do Mucuri (H); Vale do Rio Doce (I); Zona da Mata (J); Oeste (K) e Campos das Vertentes (L) do estado de Minas Gerais

podem ser visualizados na Tabela 2, e a variação desses coeficientes ao longo do ano pode ser visualizada na Figura 4A a 4L; referidos valores representam a média dos três valores calculados com base na série histórica utilizada na análise de sensibilidade.

Vê-se, na Tabela 2 e na Figura 4A a 4L, que os coeficientes de sensibilidade calculados apresentaram flutuações mensais e sazonais significativas em todas as regiões estudadas; em geral, os coeficientes de sensibilidade obtidos para a temperatura máxima do ar foram maiores ao longo do ano, para

Tabela 1. Coeficientes da equação de regressão da equação ajustada aos dados que relacionam a variação da ET_0 (mm), com a variação dos elementos meteorológicos, para as diferentes regiões do estado de Minas Gerais

Região	Elemento	a	b	R ²	Região	a	b	R ²
Sul	DPV	0,344	9.10^{-7}	1,00	Triângulo Mineiro	0,4954	2.10^{-6}	1,00
	Tmax	0,052	0,0009	1,00		0,0625	0,0015	1,00
	Tmin	0,053	0,0009	1,00		0,0633	0,0014	1,00
	RS	0,261	4.10^{-16}	1,00		0,2010	3.10^{-6}	1,00
	U2	0,190	-0,1735	0,95		0,1993	-0,1642	0,96
Centro	DPV	0,251	3.10^{-16}	1,00	Vale do Mucuri	0,1979	-4.10^{-16}	1,00
	Tmax	0,048	0,0009	1,00		0,0459	0,0015	0,99
	Tmin	0,049	0,0008	1,00		0,0466	0,0013	1,00
	RS	0,214	5.10^{-16}	1,00		0,2275	-2.10^{-16}	1,00
	U2	0,263	-0,239	0,95		0,1553	-0,1314	0,95
Vale do Jequitinhonha	DPV	0,2550	3.10^{-16}	1,00	Vale do Rio Doce	0,3896	-5.10^{-16}	1,00
	Tmax	0,0537	0,0017	0,99		0,0505	0,0010	1,00
	Tmin	0,0540	0,0020	1,00		0,0510	0,0009	1,00
	RS	0,2190	1.10^{-15}	1,00		0,2064	-9.10^{-17}	1,00
	U2	0,2216	-0,1896	0,95		0,2448	-0,2120	0,95
Região Metropolitana	DPV	0,3187	-2.10^{-16}	1,00	Zona da Mata	0,3822	-2.10^{-16}	1,00
	Tmax	0,0387	0,0023	0,99		0,0484	0,0011	1,00
	Tmin	0,0395	0,0023	0,99		0,0489	0,0011	1,00
	RS	0,2089	-2.10^{-16}	1,00		0,1999	-4.10^{-16}	1,00
	U2	0,4071	-0,3684	0,94		0,3822	-2.10^{-16}	1,00
Noroeste	DPV	0,4477	3.10^{-16}	1,00	Oeste	0,3977	-1.10^{-16}	1,00
	Tmax	0,0578	0,0015	1,00		0,0586	0,0012	1,00
	Tmin	0,0586	0,0014	1,00		0,0593	0,0011	1,00
	RS	0,2095	-9.10^{-17}	1,00		0,2083	4.10^{-16}	1,00
	U2	0,2253	-0,1751	0,96		0,3266	-0,2733	0,96
Norte	DPV	0,5045	9.10^{-17}	1,00	Campos das Vertentes	0,3719	9.10^{-17}	1,00
	Tmax	0,0630	0,0014	1,00		0,0482	0,0005	1,00
	Tmin	0,0639	0,0013	1,00		0,0487	0,0004	1,00
	RS	0,2017	-9.10^{-17}	1,00		0,1980	-4.10^{-17}	1,00
	U2	0,3044	-0,2457	0,96		0,1391	-0,1357	0,94

* a e b, são respectivamente, os coeficientes angular e linear da equação da reta ajustada

Tabela 2. Coeficientes médios de sensibilidade mensal e anual, para cada elemento meteorológico, obtidos nas diferentes localidades do estado de Minas Gerais

Região	Elem.	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
Sul	DPV	0,00	0,02	0,10	0,08	0,05	0,29	0,13	0,21	0,53	0,37	0,22	0,16	0,18
	Tmax	0,13	0,11	0,14	0,13	0,15	0,06	0,15	0,17	0,13	0,09	0,11	0,10	0,12
	Tmin	-0,02	-0,02	-0,03	-0,03	-0,04	0,06	-0,05	-0,05	-0,02	0,00	-0,01	0,00	-0,02
	RS	0,81	0,81	0,81	0,91	1,04	1,26	0,87	0,96	0,13	0,88	0,66	0,77	0,83
	U2	0,21	0,21	0,21	0,20	0,19	0,20	0,19	0,19	0,20	0,21	0,21	0,21	0,20
Centro	DPV	0,25	0,21	0,23	0,20	0,13	0,10	0,28	0,51	0,34	0,35	0,17	0,08	0,24
	Tmax	0,09	0,08	0,08	0,08	0,08	0,06	0,07	0,06	0,07	0,06	0,07	0,07	0,07
	Tmin	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02	0,04	0,03	0,03	0,03	0,04	0,02	0,02	0,03
	RS	0,53	0,60	0,57	0,67	0,54	0,82	0,73	0,80	0,07	0,59	0,60	0,48	0,58
	U2	0,22	0,22	0,22	0,21	0,21	0,20	0,20	0,20	0,21	0,22	0,22	0,22	0,21
Vale do Jequitinhonha	DPV	0,18	0,04	0,17	0,25	0,12	0,22	0,19	0,37	0,35	0,22	0,06	0,04	0,18
	Tmax	0,10	0,14	0,12	0,09	0,11	0,08	0,10	0,09	0,08	0,08	0,12	0,11	0,10
	Tmin	0,01	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,03	0,01	0,02	0,00	0,00	0,01
	RS	0,59	0,63	0,58	0,62	0,64	0,75	0,82	0,81	0,08	0,63	0,65	0,61	0,62
	U2	0,22	0,22	0,22	0,22	0,21	0,21	0,20	0,21	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22
Metropolitana	DPV	0,27	0,24	0,24	0,20	0,19	0,18	0,21	0,36	0,26	0,31	0,25	0,09	0,23
	Tmax	0,07	0,08	0,08	0,09	0,08	0,10	0,10	0,10	0,08	0,09	0,07	0,07	0,08
	Tmin	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
	RS	0,69	0,72	0,86	0,79	0,73	0,70	0,95	0,94	0,08	0,85	0,83	0,81	0,74
	U2	0,22	0,21	0,21	0,21	0,20	0,20	0,19	0,20	0,20	0,21	0,21	0,21	0,21
Noroeste	DPV	0,15	0,12	0,17	0,07	0,09	0,07	0,15	0,38	0,40	0,30	0,13	0,19	0,18
	Tmax	0,13	0,08	0,16	0,09	0,08	0,13	0,13	0,12	0,15	0,10	0,10	0,09	0,11
	Tmin	-0,03	0,03	-0,02	0,02	0,03	-0,01	0,00	0,00	-0,02	0,03	0,01	0,02	0,00
	RS	0,86	0,91	1,20	1,26	1,41	1,34	1,45	1,44	0,15	1,22	1,41	1,58	1,19
	U2	0,21	0,21	0,21	0,20	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,20	0,20	0,19	0,20

Continua na próxima página

Continuação da página anterior

Região	Elem.	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
Norte	DPV	0,23	0,15	0,29	0,17	0,20	0,24	0,31	0,53	0,49	0,36	0,19	0,15	0,28
	Tmax	0,11	0,09	0,06	0,18	0,06	0,07	0,09	0,12	0,13	0,09	0,09	0,08	0,10
	Tmin	0,02	0,04	0,07	-0,02	0,05	0,05	0,03	0,02	0,00	0,04	0,01	0,02	0,03
	RS	1,21	1,42	1,20	1,46	1,31	1,33	1,43	1,39	0,129	1,21	1,01	1,26	1,20
	U2	0,20	0,20	0,21	0,20	0,19	0,19	0,19	0,19	0,20	0,20	0,21	0,20	0,20
Triângulo Mineiro	DPV	0,12	0,12	0,16	0,12	0,16	0,12	0,23	0,31	0,18	0,21	0,18	0,10	0,17
	Tmax	0,12	0,13	0,14	0,13	0,14	0,14	0,17	0,12	0,13	0,16	0,12	0,11	0,13
	Tmin	0,00	0,00	-0,02	-0,01	-0,02	-0,02	-0,04	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	-0,01
	RS	1,14	1,03	1,24	1,09	1,13	1,18	1,48	1,42	0,13	1,53	1,41	1,45	1,19
	U2	0,21	0,21	0,20	0,20	0,19	0,19	0,18	0,19	0,19	0,19	0,20	0,19	0,20
Vale do Mucuri	DPV	0,15	0,10	0,18	0,14	0,07	0,04	0,01	0,12	0,13	0,11	0,14	0,09	0,11
	Tmax	0,09	0,08	0,08	0,07	0,17	0,07	0,09	0,10	0,07	0,08	0,07	0,07	0,09
	Tmin	0,02	0,02	0,02	0,03	-0,08	0,01	-0,01	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01
	RS	0,45	0,46	0,45	0,49	0,44	0,48	0,48	0,53	0,07	0,46	0,40	0,39	0,42
	U2	0,22	0,22	0,22	0,22	0,22	0,21	0,21	0,21	0,21	0,22	0,22	0,22	0,22
Vale do Rio Doce	DPV	0,26	0,21	0,37	0,22	0,16	0,18	0,17	0,32	0,28	0,20	0,12	0,09	0,21
	Tmax	0,06	0,07	0,06	0,07	0,06	0,05	0,06	0,07	0,06	0,07	0,06	0,06	0,06
	Tmin	0,05	0,04	0,05	0,04	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04
	RS	0,99	0,96	0,90	0,67	0,67	0,54	1,03	1,05	0,060	1,30	1,18	1,07	0,87
	U2	0,21	0,21	0,22	0,22	0,21	0,21	0,20	0,20	0,20	0,20	0,21	0,21	0,21
Zona da Mata	DPV	-0,01	0,02	0,01	-0,05	-0,12	-0,21	-0,18	-0,11	-0,11	-0,11	-0,12	-0,12	-0,09
	Tmax	0,12	0,11	0,12	0,11	0,11	0,12	0,12	0,12	0,08	0,10	0,08	0,09	0,10
	Tmin	0,00	0,00	-0,01	-0,01	-0,01	-0,02	-0,03	-0,02	0,00	0,00	0,01	0,00	-0,01
	RS	1,18	1,07	0,95	0,98	0,80	0,87	1,05	1,12	0,08	0,92	0,79	0,96	0,90
	U2	0,20	0,20	0,20	0,20	0,19	0,19	0,18	0,19	0,19	0,20	0,21	0,20	0,20
Oeste	DPV	-0,10	0,10	0,19	0,34	0,20	0,31	0,28	0,50	0,84	0,59	0,46	0,16	0,32
	Tmax	0,05	0,05	0,04	0,05	0,07	0,05	0,07	0,06	0,06	0,04	0,04	0,04	0,05
	Tmin	0,07	0,06	0,06	0,07	0,08	0,06	0,06	0,07	0,07	0,06	0,07	0,07	0,07
	RS	0,77	0,73	0,91	0,92	1,06	1,22	1,25	1,04	0,064	1,02	0,87	0,99	0,91
	U2	0,21	0,21	0,21	0,21	0,20	0,19	0,19	0,20	0,21	0,21	0,21	0,21	0,21
Campos Das Vertentes	DPV	0,03	0,07	-0,02	0,00	0,13	0,30	0,23	0,25	0,34	0,06	0,03	-0,05	0,11
	Tmax	0,11	0,10	0,12	0,11	0,10	0,10	0,10	0,11	0,10	0,10	0,09	0,09	0,10
	Tmin	0,00	0,00	0,00	-0,01	-0,01	0,00	0,00	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01	-0,01
	RS	0,74	0,92	0,85	1,09	0,97	0,92	1,09	1,12	0,100	1,06	0,94	0,91	0,89
	U2	0,21	0,20	0,20	0,19	0,19	0,19	0,18	0,19	0,19	0,19	0,20	0,20	0,19

as regiões do Triângulo Mineiro, Noroeste e Sul do estado de Minas Gerais, locais em que os valores dos coeficientes de sensibilidade para Tmax foram altos durante o inverno e relativamente baixos durante os outros meses do ano, com variação entre 0,17 a 0,06 na região Sul, fato passível de ser explicado em razão da temperatura máxima do ar ser usada para estimar vários outros termos importantes na estimativa da ET_0 , pelo método de Penman-Monteith.

Na Tabela 2 e Figura 4A a 4L, verifica-se ainda, que em todas as regiões do estado os coeficientes de sensibilidade obtidos para a temperatura mínima do ar apresentaram pequenas flutuações durante o ano, com valores inferiores e próximos de zero. Os valores dos coeficientes encontrados para velocidade do vento também apresentaram a mesma tendência, embora com valores próximos de 0,20, resultados semelhantes aos encontrados por Irmak et al. (2006), que analisaram os efeitos dos elementos climáticos sobre a ET_0 estimada pela equação de Penman-Monteith-FAO em diversas regiões dos Estados Unidos das Américas com diferentes características climáticas.

Na maioria dos locais de Minas Gerais, os coeficientes de sensibilidade (CS) para radiação solar apresentaram acentuada sazonalidade com forte tendência decrescente entre os meses

de agosto a setembro e ascendente entre os meses de setembro a outubro; já no período de novembro a agosto houve somente tendência ascendente desse coeficiente com pequenas flutuações (Figura 4). A variabilidade dos coeficientes durante o ano pode ser explicada em razão da equação de Penman-Monteith envolver o balanço de energia a nível das plantas e, assim, a diferenciação da contribuição do calor sensível e latente na partição da energia disponível durante as diferentes épocas do ano, pode ter contribuído para o ocorrido. Regiões semiáridas como a Norte, a Noroeste e o Triângulo Mineiro, apresentaram os maiores valores médios de CS, respectivamente, 1,20, 1,19 e 1,19 (Tabela 2), em contraste com a região Vale do Mucuri que apresentou, em média, o menor coeficiente ($R_s = 0,42$) com pequenas flutuações durante o ano, com exceção dos meses de agosto a outubro em que, a exemplo das outras regiões, os coeficientes apresentaram grandes variações alcançando valores próximos de zero. Destaca-se, portanto, a importância de determinação da R_s com maior exatidão nessas regiões e épocas do ano já que, em condições de aridez e em razão do maior efeito desse elemento meteorológico, pode resultar em estimativas inconsistentes da ET_0 . Segundo Allen et al. (1998), em regiões úmidas o consumo de energia raramente excede o saldo de radiação e é menor,

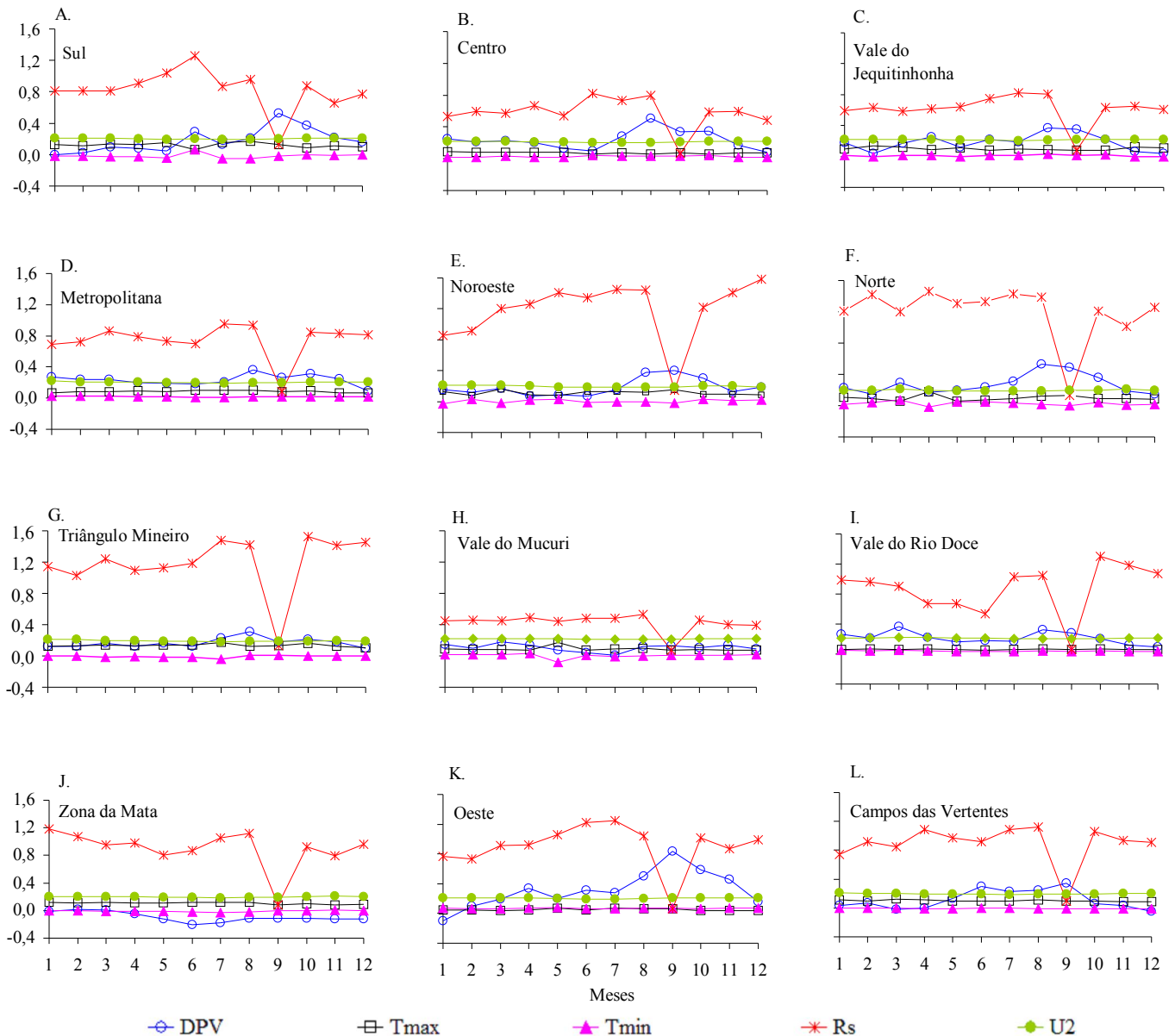


Figura 4. Variação dos coeficientes de sensibilidade ao longo do ano, nas regiões: Sul (A); Centro (B); Vale do Jequitinhonha (C); Metropolitana (D); Noroeste (E); Norte (F); Triângulo Mineiro (G); Vale do Mucuri (H); Vale do Rio Doce (I); Zona da Mata (J); Oeste (K) e Campos das Vertentes (L), do estado de Minas Gerais

desde que o ar atue como sumidouro de calor sensível e latente; contudo, em regiões áridas e semiáridas a energia consumida no processo de evapotranspiração apenas excede a energia disponível, caso a cobertura vegetal, bem suprida com água, constitua sumidouro de calor em resposta aos efeitos advectivos.

O déficit de pressão de vapor (DPV) apresentou a segunda maior influência sobre a ET_0 na maioria das regiões, com tendência oposta à da radiação solar nos meses de maior variação (junho a novembro), com maior significância nas regiões Centro e Oeste do estado, alcançando coeficientes de sensibilidade próximos de 0,84 e menor significância nas regiões Triângulo Mineiro, Vale do Mucuri e Zona-da-Mata, onde os valores dos coeficientes apresentaram pequenas variações ao longo do ano (Tabela 2); entretanto, nos outros meses os dois elementos meteorológicos apresentaram tendências

semelhantes na maioria das regiões do estado (Figura 4A a 4L). O aumento da sensibilidade do modelo ao déficit de pressão de vapor e redução à radiação solar durante os meses de junho a novembro, podem ser explicados pela redução da temperatura do ar e radiação solar no inverno e na primavera, na maioria das regiões, mas o menor efeito do DPV no Triângulo Mineiro e no Vale do Mucuri, pode ter ocorrido em virtude da menor variabilidade da temperatura do ar e radiação solar durante o ano, nessas regiões.

CONCLUSÕES

1. Os elementos meteorológicos empregados na estimativa da ET_0 pelo modelo de Penman-Monteith-FAO possuem grande variabilidade espacial no estado de Minas Gerais

condicionando, por sua vez, grande variabilidade no valor estimado da ET_0 .

2. O efeito da variação da maioria dos elementos meteorológicos sobre o valor da ET_0 , foi significativo entre as diferentes localidades do estado de Minas Gerais, com destaque para o déficit de pressão de vapor (DPV) e para a velocidade do vento (U_2).

3. A análise de sensibilidade revelou que a radiação solar (Rs) é o elemento de entrada na equação de Penman-Monteith-FAO, que deve ser medido ou estimado com maior precisão.

LITERATURA CITADA

- Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Raes, D.; Smith, M. Crop evapotranspiration - guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998. 300p. Irrigation and Drainage Paper: 56.
- Aspiázú, C.; Ribeiro, G. A.; Vianello, R. L.; Ribeiro, J. C.; Valente, O. F.; Paula Neto, F. Análise dos componentes principais aplicada na classificação climática do Estado de Minas Gerais. *Revista Árvore*, v.14, n.1, p.1-15, 1990.
- Chang, J. Climate and agriculture: An ecological survey. Chicago: Aldine Publishing Company, 1968. 304p.
- Cunha, A. R.; Escobedo, J. F. Alterações micrometeorológicas causadas pela estufa plástica e seus efeitos no crescimento e produção da cultura de pimentão. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v.11, n.1, p.15-26, 2003.
- Evangelista, A. W. P.; Pereira, G. M. Avaliação de dois tipos de evaporímetros na estimativa da evapotranspiração de referência, no interior de casa de vegetação. *Ciência e Agrotecnologia*, v.27, n.6, p.1348-1353, 2003.
- Fietz, C. R.; Fisch, G. F. Avaliação de modelos de estimativa do saldo de radiação e do método de Priestley-Taylor para a região de Dourados, MS. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.13, n.4, p.449-453, 2009.
- Irmak, S.; Payero, J. O.; Martin, D. L.; Irmak, A.; Howell, T. Sensitivity analyses and sensitivity coefficients of standardized daily ASCE-Penman-Monteith equation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v.132, n.6, p.564-578, 2006.
- Mall, R. K.; Gupta, R. D. Comparison of evapotranspiration models. *Mausam*, v.53, n.2, p.119-126, 2002.
- Marquínez, J.; Lastra, J.; Garcia, P. Estimation models for precipitation in mountainous regions: the use of GIS and multivariate analysis. *Journal of Hydrology*, v.270, n.1, p.1-11, 2003.
- Medeiros, A. T. Estimativa da evapotranspiração de referência a partir da equação de Penman-Monteith, de medidas lisimétricas e de equações empíricas, em Paraipaba, CE. *Engenharia Agrícola*, v.23, n.1, p.31-40, 2003.
- Mello, C. R.; Sá, M. A. C.; Curi, N.; Mello, J. M.; Viola, M. R.; Silva, A. M. Erosividade mensal e anual da chuva no Estado de Minas Gerais. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.42, n.4, p.537-545, 2007.
- Mendonça, F.; Danni-Oliveira, I. M. Climatologia – Noções básicas e climas do Brasil. São Paulo: Oficina de textos, 2007. 206p.
- Monteith, J. L.; Unsworth, M. H. Principles of environmental physics. New York: Chapman and Hall, 1990. 291p.
- Nandagiri, L.; Kovoov, G. M. Sensitivity of the Food and Agriculture Organization Penman-Monteith evapotranspiration estimates to alternative procedures for estimation of parameters. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v.131, n.3, p.238-248, 2005.
- Pereira, A. R.; Angelocci, L. R.; Sentelhas, P. C.; Folegatti, M. V.; Nova, N. A. V.; Maggiotto, S. R.; Pereira, F. A. C. Substantiation of the day FAO-56 reference evapotranspiration with data from automatic and conventional weather stations. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, v.10, n.2, p.251, 2002.
- Silveira, S. S.; Andrade, E. M. Análise de componentes principais na investigação da estrutura multivariada da evapotranspiração. *Engenharia Agrícola*, v.22, n.2, p.171-177, 2002.
- Smajstrla, A. G.; Zazueta, F. S.; Schmidt, G. M. Sensitivity of potential evapotranspiration to four climatic variables in Florida. *Soil and Crop Science Society of Florida*, v.46, n.1, p.21-26. 1987.
- Wei, E. C.; McGuinness, J. L. N. Reciprocal distance square method: A computer technique for estimating areal precipitation. Illinois: USDA/ARS, 1973. 30p.