AGRÁRIA
Revista Brasileira de Ciências Agrárias
ISSN (on line): 1981-0997
v.7, n.1, p.x-xx, jan.-mar., 2012
Recife, PE, UFRPE. www.agraria.ufrpe.br
DOI:10.5039/agraria.v7i1a1170
Protocolo 1170 – 22/10/2010 *Aprovado em 30/08/2011

Leônidas P. de Alencar[1,2]

Gilberto C. Sediyama[1,3]

Henderson S. Wanderley[1]

Thomé S. Almeida[1,4]

Rafael C. Delgado[1,2]

Gustavo H. S. Vieira[1,5]

Evolução temporal da evapotranspiração de referência e sua sensibilidade aos principais elementos climáticos na cidade de Uberaba – MG

RESUMO

A evolução temporal da evapotranspiração de referência (ETo) reflete os efeitos das variáveis da equação de Penman-Monteith. O conhecimento do comportamento da ETo é de fundamental importância para agricultura. Assim, o objetivo deste trabalho foi analisar os efeitos das possíveis mudanças dos elementos do clima na evapotranspiração de referência para a região de Uberaba-MG e avaliar a sensibilidade da equação de Penman-Monteith (FAO) às variações desses elementos climáticos. Mediante análise de tendência, pelo teste de Mann-Kendall, e da estatística do teste t da regressão linear, verificou-se o comportamento dos seguintes elementos climáticos: temperaturas máximas e mínimas; insolação; velocidade do vento e umidade relativa. Com base no modelo de Penman-Monteith (FAO), a ETo foi calculada e suas mudanças foram estudadas por meio da análise da sensibilidade da ETo aos elementos climáticos e, também, as tendências observadas desses elementos durante o período de 1975 a 2003. Verificou-se um aumento na evapotranspiração de referência, principalmente em razão da redução da umidade relativa e do aumento da velocidade do vento. A evapotranspiração de referência apresentou aumento da ordem de 2,85 mm por ano.

Palavras-chave: Análise de sensibilidade, Penman-Monteith, tendência.

Temporal evolution of reference evapotranspiration and its sensitivity to the key climatic elements in the city of Uberaba, Minas Gerais, Brazil

ABSTRACT

The temporal evolution of the reference evapotranspiration (ETo) reflects the effects of the variables of the Penman-Monteith equation. Understanding the ETo behavior is fundamentally important to agriculture. Thus, the aim of this work was to analyze the effects of the possible climatological elements changes on the reference evapotranspiration in the region of Uberaba, Minas Gerais, Brazil, and to assess the sensitivity of the Penman-Monteith equation (FAO) to the variations of these climatic elements. Through tendency analysis, using the Mann-Kendall statistic and the t test of linear regression, the behavior of the following climate elements were analyzed: maximum and minimum temperatures; insolation; wind speed and relative humidity. Based on the Penman-Monteith model (FAO), the ETo was calculated and its changes were studied by analyzing the sensitivity of the ETo to the climatic elements and, also, the tendencies observed from these elements over the period from 1975 to 2003. There was an increase in the reference evapotranspiration, primarily due to the reduction of the relative humidity and the increasing wind speed. The reference evapotranspiration showed an increase of about 2.85 mm per year.

Key words: Sensitivity analysis, Penman-Monteith, tendency.

[1] Universidade Federal de Viçosa, Centro de Ciências Agrárias, Departamento de Engenharia Agrícola, , Avenida Peter Henry Rolfs, s/n, Campus Universitário, CEP 36570-000, Viçosa-MG, Brasil. Fone: (31) 3899-1905. Fax: (31) 3899-2735. E-mail: lpaufv@hotmail.com; g.sediyama@ufv.br; hendynho@hotmail.com; thomeaj@hotmail.com; rcdelgado@hotmail.com; ghsvieira@gmail.com
[2] Bolsista de Doutorado do CNPq
[3] Bolsista de Produtividade em Pesquisa do CNPq
[4] Bolsista de Doutorado da FAPEMIG
[5] Bolsista de Doutorado da CAPES

INTRODUÇÃO

Devido ao aumento das concentrações dos gases do efeito estufa em grande escala, o aquecimento da superfície da Terra tornou-se evidente ao longo dos últimos anos. Essa tendência de aquecimento, muito provavelmente, continuará no futuro. Assim, as mudanças climáticas podem modificar o ciclo hidrológico, resultando em mudanças na precipitação, evapotranspiração, escoamento superficial e na intensidade e frequência das cheias e das secas (Supit et al., 2009).

A investigação dos padrões espacial e temporal das variáveis hidrológicas e sua resposta aos efeitos das mudanças climáticas e às atividades humanas são importantes para analisar os impactos sobre a agricultura e o meio ambiente (Drogue et al., 2004; Chen et al., 2007).

Pesquisadores analisaram os impactos das mudanças climáticas sobre a demanda de água na Inglaterra e no País de Gales e concluíram que um aumento de 1,1°C na temperatura média elevaria a demanda de água para a agricultura em até 12% (Herrington, 1996).

Como a agricultura é a grande usuária de água em todo o mundo, as mudanças no uso da água na agricultura terão grandes impactos na disponibilidade de água.

Como principal responsável pela perda de água nas bacias hidrográficas, a evapotranspiração exerce uma grande influência sobre os processos hidrológicos, sendo que este componente está estreitamente relacionado com a dinâmica da umidade do solo, a recarga dos aquíferos e o escoamento superficial (Liang et al., 2008).

Estimativas precisas da evapotranspiração são essenciais para identificar as variações temporais sobre a necessidade de irrigação, melhorar a alocação dos recursos hídricos e avaliar o efeito do uso da terra e mudanças no balanço hídrico (Ortega-Farias et al., 2009)

Poucos estudos têm avaliado a evapotranspiração de referência (ETo) no contexto de sua variação temporal. Xu et al. (2006) analisaram a tendência temporal da ETo e a evaporação de tanques na bacia do rio Changjiang (China) e verificaram uma tendência significativa de diminuição durante o período de 1961-2000 para ambos.

A região de Uberaba tem grande importância econômica devido à agricultura, sendo o município um dos maiores produtores de milho e soja do estado de Minas Gerais. Por isso, o conhecimento da distribuição e das tendências da evapotranspiração de referência (ETo) é extremamente importante para o planejamento de recursos hídricos e para a agricultura irrigada.

O objetivo do presente estudo foi: a) identificar as possíveis tendências nas séries climatológicas de temperaturas máximas e mínimas, insolação, velocidade do vento e umidade relativa; b) analisar os efeitos das mudanças desses elementos climáticos na evapotranspiração de referência; e c) analisar a sensibilidade da equação de Penman-Monteith (FAO) e a importância relativa desses elementos na estimativa da ETo.

MATERIAL E MÉTODOS

A área de estudo compreende a região da cidade de Uberaba, que está localizada na região do Triângulo Mineiro, situada a 19° 45' de latitude sul, 47° 55' de longitude oeste e altitude de 743m.

Foram utilizados dados diários da estação climatológica pertencente ao Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), dos seguintes elementos do clima: temperatura máxima, temperatura mínima, umidade relativa, velocidade do vento e insolação. O período de abrangência dos dados foi de 1975 a 2003, totalizando 29 anos de dados.

O critério utilizado para o preenchimento de falhas, isto é, ausências de dados necessários ao cálculo da ETo pelo método de PM-FAO, foi rigorosamente avaliado e foi estabelecido o padrão recomendado no boletim da FAO Nº 56 de 1998. Para os dias com ausência de dados no mês, foi considerada a média do mês em questão para o preenchimento da falha.

No estudo das possíveis tendências dos elementos climáticos, foram considerados os valores médios mensais e anuais. Para cada elemento climático estudado, foram aplicados os testes da análise de regressão linear e o teste de Mann-Kendall.

Análise de tendência

O teste de Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975) é uma análise estatística não-paramétrica, que considera a hipótese de estabilidade de uma série temporal. A sucessão de valores ocorre de forma independente e a distribuição de probabilidade deve permanecer sempre a mesma (série aleatória simples). Considerando-se uma série temporal de Yi de n termos (1 d" i d" n), a estatística desse teste é dada por:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^{n} \text{sinal}\left(Y_j - Y_i\right) \quad (1)$$

em que

$$\text{sinal}\left(Y_j - Y_i\right) = \begin{cases} +1 & \text{se}\left(Y_j - Y_i\right) > 0 \\ 0 & \text{se}\left(Y_j - Y_i\right) = 0 \\ -1 & \text{se}\left(Y_j - Y_i\right) < 0 \end{cases}$$

Para séries com grande número de termos (n), sob a hipótese nula (Ho) de ausência de tendência verdadeira, S apresenta uma distribuição normal com média zero e variância:

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (2)$$

A significância estatística de S pode ser também testada, para grandes valores da estatística z, para a hipótese alternativa (H_1) usando o teste bilateral para z, calculado da seguinte forma:

$$z = \begin{cases} \dfrac{(S-1)}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{se } S > 0 \\ 0 & \text{se } S = 0 \\ \dfrac{(S+1)}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{se } S < 0 \end{cases} \quad (3)$$

Com base na análise da estatística z, para o teste de nulidade, é feita, então, a decisão final de aceitar ou rejeitar Ho, ou seja, pode-se confirmar a hipótese de estabilidade dos dados ou rejeitá-la a favor da hipótese alternativa, isto é, a de existência de tendência nos dados. O sinal da estatística z indica se a tendência é crescente (z > 0) ou decrescente (z < 0). Em um teste bilateral para tendência, H_1 deve ser aceita se $|z| \geq Z_{á/2}$, em que o valor de $Z_{á/2}$ é obtido na tabela da distribuição normal padrão.

A análise de regressão também pode ser utilizada para identificar a tendência na série temporal, por meio do teste de significância do coeficiente angular da reta. Considerando-se a equação da reta:

$$Y = a + bX \quad (4)$$

em que Y - elemento do clima; X - tempo; *a* e *b* - coeficientes da regressão calculados pelo método dos mínimos quadrados.

Considerando a regressão linear de Y com a variável aleatória no tempo X, a hipótese nula (Ho) de que não existe uma tendência é testada por meio do teste t de Student com n - 2 graus de liberdade:

$$t = \frac{r\sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} = \frac{b}{s/\sqrt{SSx}} \quad (5)$$

em que n - tamanho da amostra; r - coeficiente de correlação de Pearson; s - desvio-padrão dos resíduos; *b* - coeficiente angular da reta; SS_X - soma dos quadrados da variável independente (tempo em análise de tendência).

A hipótese de que não há tendência é rejeitada quando o valor de t calculado pela equação 5 é maior, em valor absoluto, do que o valor crítico $t_{(á, n-2)}$, tabelado, a um determinado nível de significância a.

Cálculo da evapotranspiração

Com o objetivo de padronizar o conceito de evapotranspiração, em diferentes regiões, a FAO (Food and Agriculture Organization) propôs o termo evapotranspiração de referência (ETo), calculado pela equação de Penman-Monteith (PM-FAO), definido como a taxa de evapotranspiração de uma superfície de referência (padrão grama hipotética) com altura de 0,12 m, uma resistência de superfície de 70 s m^{-1} e um albedo de 0,23. Vale salientar que foi considerada a superfície de referência como uma cultura hipotética de altura uniforme, sem restrições de água, crescendo ativamente e sombreando completamente o solo (Allen et al., 2006).

Os dados meteorológicos diários utilizados para a obtenção da evapotranspiração de referência diária foram: temperatura máxima; temperatura mínima; umidade relativa; velocidade do vento e insolação. Para o cálculo da evapotranspiração e para a verificação dos possíveis efeitos das alterações dos elementos climáticos na evapotranspiração, utilizou-se a equação de Penman-Monteith (FAO), parametrizada pela FAO (Allen et al., 2006), para o intervalo de tempo de 24 horas.

$$ET_0 = \frac{0{,}408\Delta(R_n - G) + \gamma\frac{900}{T+273}u_2(es-ea)}{\Delta + \gamma(1+0{,}34u_2)} \quad (6)$$

em que ETo - evapotranspiração de referência (mm d^{-1}); Rn - saldo de radiação à superfície da cultura (MJ m^{-2}); G - densidade do fluxo de calor do solo (MJ m^{-2}); T - temperatura do ar a 2 m de altura (°C); u_2 - velocidade de vento a 2 m de altura (m s^{-1}); es - pressão de vapor de saturação (kPa); ea - pressão parcial de vapor (kPa); Δ - declividade da curva de pressão de vapor de saturação (kPa $°C^{-1}$); e γ - coeficiente psicrométrico (kPa $°C^{-1}$).

As equações padronizadas para o cálculo de todos os parâmetros da equação (6) são apresentadas em Allen et al. (2006).

Com o objetivo de quantificar as contribuições dos elementos climáticos para a tendência da evapotranspiração de referência (ETo), os seguintes procedimentos foram estabelecidos: (1) remoção das tendências nas séries de dados dos elementos climáticos que apresentam tendência significativa, de modo a torná-las em séries temporais estacionárias; (2) recálculo da evapotranspiração de referência usando, para cada tempo (período), as séries de dados retificadas e utilizando os dados originais para outras variáveis; e (3) comparação dos resultados da ETo, calculados com os dados originais com a ETo obtida depois da remoção da tendência das variáveis.

A retificação dos dados foi obtida através da remoção do valor do coeficiente angular da equação de regressão ajustada para as séries de dados.

Análise de sensibilidade

A sensibilidade da equação de PM-FAO, para a área de estudo, foi quantificada em relação à velocidade do vento, as temperaturas máximas e mínimas do ar, a umidade relativa e a insolação. O procedimento referente à análise de sensibilidade foi realizado em função das possíveis mudanças nos elementos climáticos analisados, considerando-se um intervalo de acréscimo e decréscimo nos valores de cada variável estudada.

Por causa das diferentes abordagens utilizadas nos modelos parametrizados de evapotranspiração, há diferentes definições dos coeficientes de sensibilidade e diferentes maneiras de se realizarem as análises de sensibilidade nestes modelos. Ademais, diferentes variáveis têm diferentes dimensões e intervalos, o que torna difícil comparar a sensibilidade por derivadas parciais (Gong et al., 2006). Revisões na literatura, de estudos anteriores, revelam que não existe um procedimento comum ou padrão para o cálculo dos coeficientes de sensibilidade para as variáveis climáticas (Irmak et al., 2006).

Desta maneira, realizou-se a análise de sensibilidade pelo método da curva de sensibilidade. Para tal, traçaram-se as mudanças relativas de uma variável dependente contra as alterações relativas de uma variável independente como uma curva, sendo que o coeficiente de sensibilidade é obtido pela inclinação da reta.

Tendo em vista as metodologias utilizadas por diferentes pesquisadores (Goyal et al., 2004; Xu et al.,2006), os elementos meteorológicos foram testados para uma gama de variabilidades específicas para a análise. O procedimento para

esta análise foi realizado da seguinte forma:

Adotaram-se diferentes cenários de mudança nos elementos meteorológicos, ajustando-se os dados das series históricas, adicionando-se uma variação na média dos elementos, como segue:

$$\Delta X = 0,\ \pm 5\%,\ \pm 10\%,\ \pm 15\%,\ \pm 20\%\ de\ X(t) \quad (7)$$

em que, X é o elemento climático e t, o tempo.

Desta maneira, o coeficiente de sensibilidade é calculado como:

$$CS = \frac{DRES}{DVAR} \quad (8)$$

$$DRES = \frac{RES - RES_{base}}{RES_{base}} \quad (9)$$

$$DVAR = \frac{VAR - VAR_{base}}{VAR_{base}} \quad (10)$$

em que DRES - variação relativa da resposta do modelo de simulação; DVAR - variação relativa do componente ou da variável de simulação; RES - resposta do modelo na simulação; VAR - valor do componente ou da variável na simulação; RES_{base} - resposta do modelo na formulação básica; e VAR_{base}- valor do componente ou da variável na formulação básica.

Para a umidade relativa, foram considerados um aumento e uma diminuição de 15%, tendo em vista que para aumentos superiores a este valor, os resultados ultrapassariam o limite de 100% de umidade relativa.

O sinal do coeficiente de sensibilidade relativa determina como o modelo (equação de PM-FAO) reage à mudança do parâmetro de entrada, ou seja, um aumento (uma diminuição) do parâmetro levando a um aumento (diminuição) da variável de saída. Para ilustrar a interpretação do coeficiente de sensibilidade, considera-se que a sensibilidade relativa de um dado componente da equação de PM-FAO foi determinada como sendo igual a 0,50. Se ocorrer variação de 10% nesse componente, a variação transmitida a ETo será, então, da ordem de 5%.

Resultados e Discussão

Análise de tendência

Para a análise de tendência dos elementos climáticos, foram aplicados os testes de Mann-Kendall e o teste t do coeficiente angular da regressão linear para as séries mensais e anuais (Tabela 1).

Houve aumento da temperatura máxima média para quase todos os meses, exceto para os meses de fevereiro e maio. A única tendência estatisticamente significativa, a 5% de probabilidade, foi observada para o mês de dezembro pelo teste de Mann-Kendall, sendo que este aumento foi de aproximadamente 0,36 °C por década.

Analisando o coeficiente angular da equação de regressão linear para as séries de temperatura mínima média mensal, observa-se que houve uma redução, não significativa, para quase todos os meses do ano, exceto os meses de junho, julho e dezembro. A menor redução da temperatura mínima foi verificada para o mês de agosto, sendo que esta redução foi de 0,26 °C por década. A série de temperatura mínima média anual também apresentou redução ao longo dos 29 anos de dados.

Estes resultados mostram-se coerentes com os resultados obtidos por Minuzzi et al. (2010), que estudaram as oscilações climáticas para várias cidades de Minas Gerais e verificaram que não houve tendências significativas para as temperaturas mínimas e máximas para a cidade de Uberaba, durante o período de 1961 a 2004.

Apesar de trabalhos que relatam o aumento das temperaturas mínimas, máximas e médias ao redor de todo o mundo, foi verificado que só houve um aumento estatisticamente significativo da temperatura máxima no mês de dezembro, sendo que alguns meses apresentam reduções.

Nota-se que, para as séries de dados de insolação, não houve tendências significativas de aumento ou diminuição. A redução da insolação observada nos meses de janeiro, fevereiro e março está coerente com a redução das temperaturas mínimas e máximas para esses meses.

A velocidade do vento apresentou tendência de aumento em todos os meses, sendo que apenas nos meses de fevereiro, abril, maio, junho e julho esse aumento foi estatisticamente significativo, a 5% de probabilidade, pelo teste de Mann-Kendall. Porém, pelo teste t, o mês de fevereiro não apresentou tendência significativa; por sua vez, a série anual pode ser considerada estatisticamente significativa, a 5% de probabilidade. O maior aumento observado foi verificado para o mês de maio, da ordem de 0,25 m s^{-1}, por década.

A umidade relativa apresentou tendência de diminuição para todos os meses do ano, sendo que, para os meses de janeiro, fevereiro e março, a tendência não foi estatisticamente significativa, a 5% de probabilidade. A menor redução da umidade relativa foi observada para o mês de agosto, apresentando uma redução da ordem de 1,05% por ano.

Análise de tendência da evapotranspiração

A partir dos dados de evapotranspiração de referência diária, foi calculada a evapotranspiração mensal e anual e, assim, foi analisado o comportamento da evapotranspiração de referência (ETo) ao longo dos anos.

Como esperado, uma vez que a ETo é afetada pelos elementos climáticos, a ETo apresenta flutuações sazonais (Figura 1).

A ETo é superior a 90 mm, em média, para todos os meses do ano, atingindo seu ponto máximo em outubro, com um valor médio de 152 mm. A soma da evapotranspiração do período de setembro a março (período de maiores índices pluviométricos) corresponde a 64% da evapotranspiração total anual que é de 1495 mm por ano.

Analisando os coeficientes angulares das equações de regressão (b) para a evapotranspiração de referência (Tabela 1), observa-se que a maioria dos meses analisados apresentou uma tendência de aumento estatisticamente significativa, exceto os meses de janeiro, fevereiro e março, que apresentaram uma diminuição da evapotranspiração. Apesar do aumento verificado para os meses de setembro, outubro,

Tabela 1. Resultado dos testes de Mann Kendall (TMK), coeficiente angular da equação de regressão linear (*b*) para as séries de dados de temperaturas máximas e mínimas, insolação, velocidade do vento, umidade relativa e evapotranspiração de referência (ETo)

Table 1. Results of the Mann Kendall test (TMK), slope of the linear regression equation (b) for the data sets of maximum and minimum temperatures, insolation, wind speed, relative humidity and reference evapotranspiration (ETo)

Elemento do clima	Temp. máxima		Temp. mínima		Insolação		Velocidade do vento		Umidade relativa		ETo	
Teste	TMK	*b*	TMK	*b*	TMK	*b*	TMK	*b*	TMK	*b*	TMK	*b*
Jan	0,225	0,010	-0,600	-0,008	-1,785	-0,036	1,557	0,012	-1,519	-0,159	-0,582	-0,069
Fev	-0,694	-0,009	-1,369	-0,014	-0,850	-0,045	2,270*	0,020	-1,613	-0,120	-0,206	-0,198
Mar	-1,857	-0,044	-0,100	-0,005	-1,292	-0,040	1,388	0,013	-1,219	-0,142	-0,919	-0,251
Abr	1,257	0,031	-0,600	-0,006	-0,340	0,019	2,420*	0,018*	-3,433**	-0,440**	2,082*	0,420*
Mai	-1,294	-0,028	-1,707	-0,041	-0,391	0,001	2,795**	0,025**	-3,920**	-0,534**	2,082*	0,232**
Jun	0,169	0,008	0,994	0,010	0,425	0,012	2,214*	0,023*	-3,620**	-0,702**	3,208**	0,391**
Jul	1,219	0,024	0,825	0,018	-0,034	0,001	2,345*	0,025*	-4,521**	-0,842**	2,851**	0,418**
Ago	0,131	0,009	-0,825	-0,026	1,770	0,023	1,257	0,019	-4,146**	-1,053**	1,782	0,542*
Set	1,144	0,045	0,169	-0,001	0,951	0,010	1,632	0,022	-2,832**	-0,78**	1,557	0,469
Out	0,825	0,042	-0,150	-0,001	-0,992	-0,013	1,838	0,012	-3,433**	-0,709**	1,013	0,418
Nov	1,238	0,022	0,019	-0,002	-1,371	-0,021	0,844	0,007	-2,983**	-0,512**	0,319	0,071
Dez	2,026*	0,036	0,863	0,016	0,034	0,024	0,488	0,006	-4,183**	-0,514**	1,032	0,410
Anual	0,882	0,012	-0,469	-0,005	-0,680	-0,005	1,444	0,017*	-4,258**	-0,542**	2,682**	2,85**

*significativo a 5% de probabilidade, **significativo a 1% de probabilidade

novembro e dezembro, estes aumentos não foram estatisticamente significativos pela análise de tendência.

Os resultados do teste t e de Mann-Kendall apresentaram boa concordância entre si, exceto apenas para o mês de agosto que apresentou uma tendência estatisticamente significativa, a 5% de probabilidade pelo teste t, porém não foi constatada esta tendência pelo teste de Mann-Kendall.

Os maiores aumentos da ETo foram da ordem de 0,54 e 0,42 e 0,41 mm mês^{-1} ano^{-1}, para os meses de agosto, abril e julho, respectivamente, sendo que estes meses apresentaram tendências estatisticamente significativas. Nesses meses, o maior aumento da ETo deveu-se, principalmente, ao aumento da velocidade do vento e à redução da umidade relativa ao longo dos anos.

O aumento da ETo ocorre nos meses em que a demanda por recursos hídricos é maior (meses de abril a setembro), visto que nesses meses há uma diminuição da precipitação na região, sendo que, nesse período, a irrigação tem um papel fundamental na produção agrícola.

Os meses de janeiro, fevereiro e março apresentaram uma tendência à diminuição da evapotranspiração de referência, em função do balanceamento das variáveis meteorológicas na equação de Penman-Monteith (FAO). Foi verificado que, para esses meses, ocorreu uma redução da insolação e, consequentemente, uma diminuição das temperaturas mínimas e máximas, contribuindo para a redução da ETo. Porém, nesses meses, ocorreu também um aumento da velocidade do vento e uma redução da umidade relativa, responsáveis pelo aumento da evapotranspiração de referência.

As reduções observadas na evapotranspiração de referência para os meses de janeiro, fevereiro e março foram de 0,69, 1,98 e 2,50 mm mês^{-1} por década.

A evapotranspiração de referência anual é o reflexo da evapotranspiração de todos os meses. Assim, a elevação da

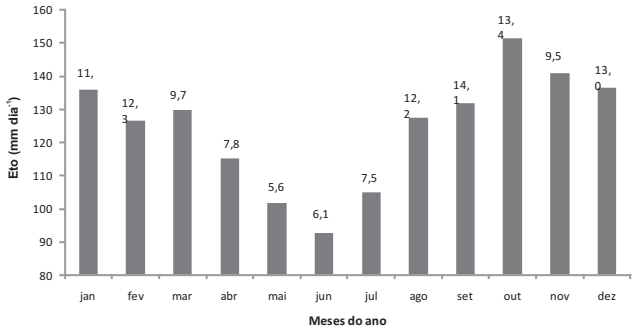

Figura 1. Evapotranspiração de referência média e os desvios-padrão para os meses do ano

Figure 1. Mean reference evapotranspiration and standard deviations for the months of the year

ETo, ao longo da maioria dos meses, proporcionou um aumento de 2,85 mm por ano em média na ETo anual.

A elevação da evapotranspiração anual foi devida, principalmente, à diminuição da umidade relativa e o aumento da velocidade do vento.

Contribuição dos elementos climáticos para a tendência crescente da ETo

As séries de dados que apresentaram tendência significativa foram as séries de velocidade do vento e umidade relativa, assim, foram removidas as tendências destas séries de modo a torná-las séries estacionárias.

Uma clara diferença pode ser notada nas séries de dados originais e retificada para os dois elementos climáticos, lembrando que as séries retificadas não apresentam tendência, ou seja, o coeficiente angular da equação de regressão

ajustada da série é zero (Figura 2).

A diferença entre a série original da ETo anual e a série recalculada de ETo, a partir das séries retificadas de velocidade do vento e umidade relativa, mostram os efeitos da tendência desses elementos climáticos atuando na ETo (Figura 3). Os resultados demonstram que a ETo recalculada a partir da série de dados retificados da velocidade do vento foi inferior à ETo original. A ETo recalculada a partir da série de dados retificados de umidade relativa foi inferior a ambas, sendo que a remoção da tendência da umidade relativa foi a que apresentou menores valores da ETo.

A ETo calculada com os dados originais apresenta um valor médio de valor de 1495 mm por ano, considerando-se os 29 anos de dados; já a ETo recalculada a partir dos dados retificados de velocidade do vento apresentou uma ETo média de 1465 mm e, finalmente, a ETo recalculada a partir dos dados retificados de umidade relativa apresentou um valor médio de 1390 mm por ano.

Estes resultados revelam que a tendência de queda na umidade relativa é a principal causa da tendência crescente encontrada para a evapotranspiração de referência, enquanto que a tendência de aumento na velocidade do vento contribuiu para uma magnitude ainda maior para este aumento da ETo.

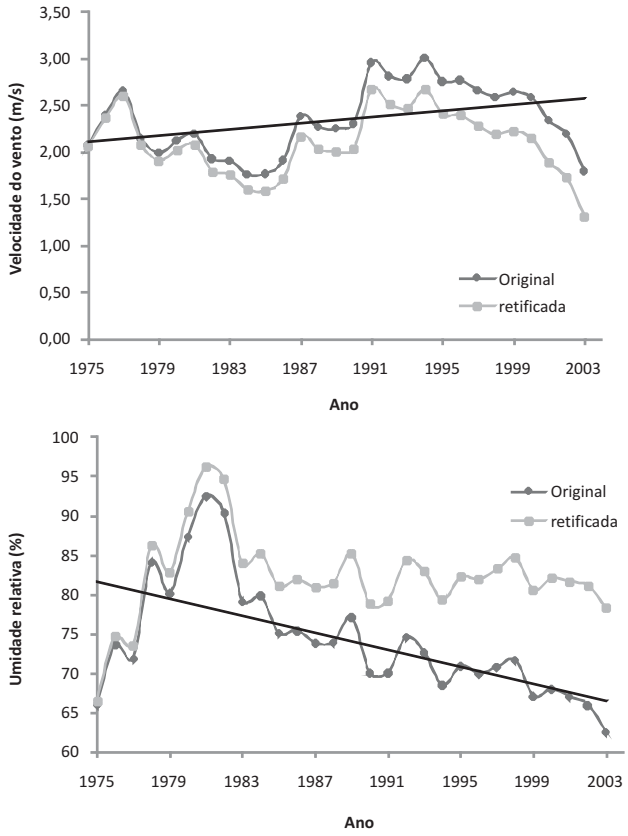

Figura 2. Série de dados original e retificada da velocidade do vento e umidade relativa do ar durante 1975 a 2003 para a cidade de Uberaba e as tendências lineares ajustadas para a série de dados original

Figure 2. Series of original and rectified data of wind speed and relative humidity from 1975 to 2003 for the city of Uberaba, Minas Gerais, Brazil, and adjusted linear tendencies for the original data set

Análise de sensibilidade da equação de PM-FAO

Para o melhor entendimento dos resultados obtidos na seção anterior, procedeu-se a análise de sensibilidade da evapotranspiração de referência para os elementos climáticos.

No resultado da análise de sensibilidade, a inclinação da reta dos gráficos fornece o coeficiente de sensibilidade para cada elemento climático (Figura 4). Nota-se que as duas variáveis mais sensíveis foram temperatura máxima e a umidade relativa, seguido da insolação, velocidade do vento e temperatura mínima com os seguintes coeficientes de sensibilidade média: 1,01; -0,53; 0,31; 0,19; e -0,15, respectivamente.

O sinal negativo nos coeficientes de sensibilidade da temperatura mínima e da umidade relativa mostram que um aumento nesses elementos climáticos acarreta em uma redução da ETo.

A combinação dos resultados da análise de sensibilidade com os dados da Tabela 1 explicam os resultados da Figura 3, como, por exemplo, por um lado a tendência de diminuição na umidade relativa é mais forte entre todos os quatro elementos climáticos (Tabela 1) o que, aliada à alta sensibilidade desta variável, contribuiu para o aumento da evapotranspiração de referência.

Por outro lado, a velocidade do vento apresenta uma média sensibilidade (Figura 4) menor que o coeficiente de sensibilidade da úmida relativa. Porém, este elemento climático apresentou tendência estatisticamente significativa de aumento para os meses de abril, maio, junho e julho (Tabela 1). Assim, sua contribuição para a tendência crescente da evapotranspiração de referência foi muito menor do que a influência da umidade relativa.

Embora a temperatura máxima seja a variável que apresente o maior coeficiente de sensibilidade, esta não tem contribuição para a tendência crescente da evapotranspiração de referência, porque não foi observada nenhuma tendência estatisticamente significativa para este elemento, exceto no mês de dezembro.

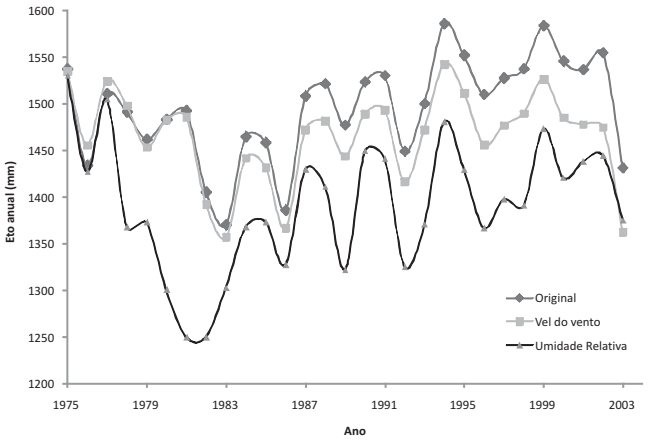

Figura 3. Evapotranspiração de referência anual obtida a partir dos dados originais, ETo recalculada após a retificação das séries de velocidade do vento e umidade relativa

Figure 3. Annual reference evapotranspiration obtained from the original data, ETo recalculated after rectification of the series of wind speed and relative humidity

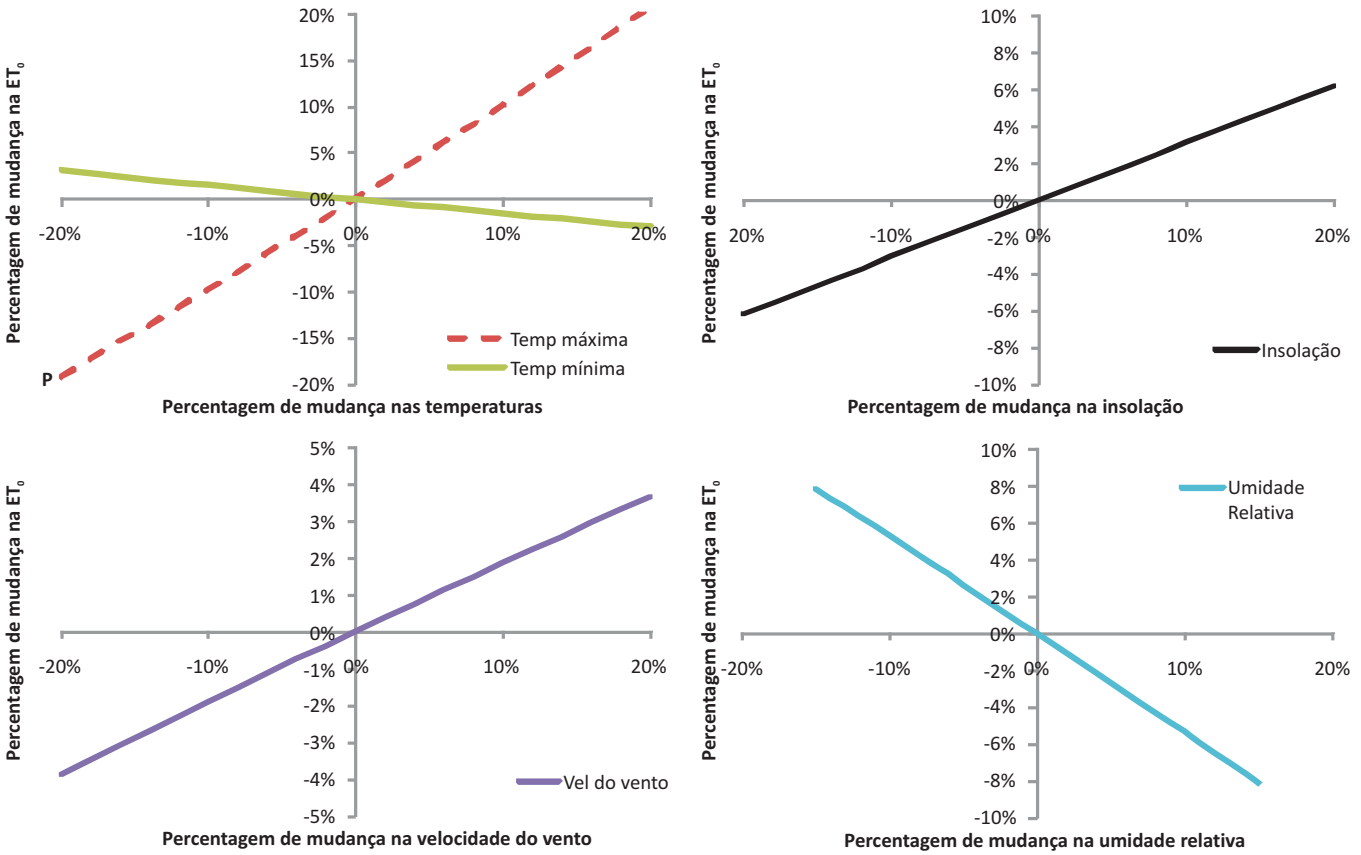

Figura 4. Análise de sensibilidade para os quatro elementos climáticos estudados

Figure 4. Sensitivity analysis for the four climatic elements studied

Conclusões

As séries de temperaturas máximas e mínimas não apresentaram tendências de aumento, exceto no mês de dezembro.

Pela análise de sensibilidade, observou-se que o maior coeficiente de sensibilidade foi observado para temperatura máxima seguida da umidade relativa, insolação, velocidade do vento e temperatura mínima.

O maior aumento da evapotranspiração de referência foi consequência da tendência à diminuição da umidade relativa e a alta sensibilidade da equação de PM-FAO a este elemento climático, para a região de estudo.

A evapotranspiração de referência apresentou um aumento de 2,85 mm por ano.

Literatura Citada

Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D.; Smith, J. Evapotranspiration del cultivo: guias para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Roma: FAO, 2006. 298p. (Estudio Riego e Drenaje, Paper 56).

Chen, H.; Guo S.L.; Xu, C.Y.; Singh, V.P. Historical temporal trends of hydro-climatic variables and runoff response to climate variability and their relevance in water resource management in the Hanjiang basin. Journal of Hydrology, v.344, n.3-4, p.171-184. 2007. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169407003800>. doi:10.1016/j.jhydrol.2007.06.034. 10 Jun. 2010.

Drogue, G.; Pfister, L.; Leviandier, T. E.; Idrissi, A.; Iffly, J.F,; Matgen, P.; Humbert, J.; Hoffmann, L. Simulating the spatio-temporal variability of streamflow response to climate change scenarios in a mesoscale basin. Journal of Hydrology, v. 293, n.1-4, p. 255–269. 2004. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169404000903>. doi:10.1016/j.jhydrol.2004.02.009. 18 Jun. 2010.

Gong, L.; Xu, C.; Chen, D.; Halldin, S.; Chen, Y.D. Sensitivity of the Penman-Monteith reference evapotranspiration to key climatic variables in the Changjiang (Yangtze River) basin. Journal of Hydrology, v.329, n.3-4, p. 620–629. 2006. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169406001399>. doi:10.1016/j.jhydrol.2006.03.027. 18 Jul. 2010.

Goyal, R.K. Sensitivity of evapotranspiration to global warming: a case study of arid zone of Rajasthan (India). Agricultural Water Management, v. 69, n.1, p. 1-11, 2004. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378377404001441>. doi:10.1016/j.agwat.2004.03.014. 12 Jun. 2010.

Herrington, P. Climate change and the demand for water. London: Department of the Environment, 1996. 164p.

Irmak, S.; Payero, J.O.; Martin, D.L.; Irmak, A.; Howell, T.A. Sensitivity analyses and sensitivity coefficients of standardized daily ASCE-Penman-Monteith equation. Journal of Irrigation Drainage Engineerin, v.132, n.6, p. 564-578, 2006. <http://ascelibrary.org/iro/resource/1/jidedh/v132/i6/p564_s1?isAuthorized=no>. doi:10.1061/(ASCE)0733-9437(2006)132:6(564). 22 Jun. 2010

Kendall, M.G. Rank correlation methods. London: Charles Griffin, 1975. 202p.

Liang, L.; Lijuan, L.; Zhang, L.; Li, J. Sensitivity of Penman-Monteith reference crop evapotranspiration in Tao'er River Basin of northeastern China. Chinese Geographical Science, v.18, n.4, p.340-347, 2008. <http://www.springerlink.com/content/0p145mp3tp308v09/>. doi:10.1007/s11769-008-0340-x. 20 Sep. 2010.

Mann, H.B. Non-parametric test against trend. Econometrika, v.13, n.3, p.245-259, 1945.< http://www.jstor.org/pss/1907187>. 20 Sep. 2010.

Minuzzi, R. B.; Vianello, R. L.; Sediyama, G. C. Oscilações climáticas em minas gerais. Revista Brasileira de Meteorologia, v. 25, n. 2, p. 227-236, 2010. <http://www.scielo.br/pdf/rbmet/v25n2/a07v25n2.pdf>. doi:10.1590/S0102-77862010000200007. 20 Jul. 2010.

Ortega-Farias, S.; Irmak, S.; Cuenca, R. Special issue on evapotranspiration measurement and modeling. Irrigation Science, v.28, n.1, p. 1–3, 2009. <http://www.springerlink.com/content/m517k10k7305kxur/fulltext.pdf>. doi:10.1007/s00271-009-0184-x. 20 Jul. 2010.

Supit, C.A.; Van Diepen, H.L.; Boogaard, F.; Ludwig, B.; Baruth, T. Trend analysis of the water requirements, consumption and deficit of field crops in Europe, Agricultural and Forest Meteorology, v 150, n. 1, p. 77-88, 2009. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168192309002184>. doi:10.1016/j.agrformet.2009.09.002 12 Jul. 2010.

Xu, C.Y.; Gong, L.; Jiang, T.; Chen, D.; Singh, V.P. Analysis of spatial distribution and temporal trend of reference evapotranspiration in Changjiang (Yangtze River) basin. Journal of Hydrology, v. 30, n.1-2, p. 81-93, 2006. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169405006001>. doi:10.1016/j.jhydrol.2005.11.029. 20 Jul. 2010.