

AGROMETEOROLOGIA

EVAPOTRANSPIRAÇÃO E COEFICIENTES DE CULTIVO DE CAFEIROS EM FASE DE FORMAÇÃO ⁽¹⁾

DANILTON LUIZ FLUMIGNAN ⁽²⁾; ROGÉRIO TEIXEIRA DE FARIA ⁽³⁾

RESUMO

A quantificação do consumo hídrico das culturas é fundamental para diversas aplicações na agricultura. Neste estudo, lisímetros de pesagem instalados em Londrina (PR), foram usados para determinar a evapotranspiração (ET) de cafeeiros da cultivar IAPAR 59, não irrigado e irrigado por aspersão e gotejamento, durante dois anos após a implantação da lavoura. O coeficiente de cultivo (Kc) foi obtido nos tratamentos irrigados a partir da razão entre ET e a evapotranspiração de referência (ET_o) estimada pelo método Penman-Monteith. Os valores de ET e Kc dos tratamentos analisados variaram em função do método de irrigação, frequência de chuvas, demanda da atmosfera e evolução da área foliar. O tratamento irrigado por aspersão foi aquele com os maiores valores médios anuais de ET (3,1 e 3,4 mm dia⁻¹ para o primeiro e segundo ano, respectivamente), seguido do gotejamento (2,9 mm dia⁻¹ para o segundo ano) e do não-irrigado (2,2 e 2,5 mm dia⁻¹ para o primeiro e segundo ano, respectivamente). O valor médio anual de Kc foi maior para o tratamento irrigado por aspersão (0,99 e 1,03 para o primeiro e segundo ano, respectivamente) e menor para o irrigado por gotejamento (0,92 para o segundo ano).

Palavras-chave: lisímetro, irrigação, *Coffea arabica*.

ABSTRACT

EVAPOTRANSPIRATION AND CROP COEFFICIENTS OF COFFEE TREES DURING CROP FORMATION

Quantifying crop water consumption is essential for many applications in agriculture. Evapotranspiration (ET) of coffee trees, cultivar IAPAR 59, under sprinkler and drip irrigation and no irrigation, were determined by weighing lysimeters in an experiment conducted in Londrina, Paraná State, Brazil, during two years after crop installation. The crop coefficient (Kc) values were determined for the irrigated treatments by the ratio between ET and reference evapotranspiration (ET_o) estimated with the Penman-Monteith method. The values of ET and Kc were influenced by irrigation method, rainfall frequency, atmospheric demand and leaf area evolution. The sprinkler irrigated treatment presented the higher mean annual ET values (3.1 and 3.4 mm day⁻¹ for the 1st and 2nd year, respectively), followed by drip irrigation (2.9 mm day⁻¹ for the 2nd year) and no irrigation (2.2 and 2.5 mm day⁻¹ for the 1st and 2nd year, respectively). The mean annual Kc value was higher under sprinkler (0.99 and 1.03 for the 1st and 2nd year, respectively) and lower for drip irrigation (0.92 for the 2nd year).

Key words: lysimeter, irrigation, *Coffea arabica*.

⁽¹⁾ Recebido para publicação em 29 de novembro de 2007 e aceito em 21 de outubro de 2008.

⁽²⁾ Mestrando em Agronomia, Departamento de Agronomia, Universidade Estadual de Londrina, Londrina (PR). E-mail: daniltonlf@pop.com.br. Bolsista da CAPES.

⁽³⁾ Área de Engenharia Agrícola, Instituto Agronômico do Paraná, Caixa Postal 481, 86001-970 Londrina (PR). E-mail: rtfaria@iapar.br (*) Autor correspondente.

1. INTRODUÇÃO

A quantificação do consumo de água das culturas é de suma importância para diversas aplicações na agricultura, tais como estudos de zoneamento agrícola, monitoramento agroclimático, manejo de irrigação e drenagem e estudos hidrológicos em geral.

O consumo de água de uma cultura pode ser expresso na forma de evapotranspiração (ET), que engloba a evaporação (E) e a transpiração (T) (ALLEN et al., 1998). Além da ET do cultivo de interesse, determina-se também a evapotranspiração de referência (ET_o), que corresponde à demanda evaporativa da atmosfera (ALLEN et al., 1998) e pode ser satisfatoriamente estimada com dados meteorológicos pelo método padrão Penman-Monteith (ALLEN, 1986; SMITH, 1991; ALLEN et al., 1998).

Da razão entre ET da cultura cultivada sob ótimas condições de manejo (inclusive hídrica) e ET_o resulta o coeficiente de cultivo (Kc) (ALLEN et al., 1998; DOORENBOS e KASSAM, 1979), que reflete a habilidade de um cultivo em atender a demanda da atmosfera (JENSEN et al., 1990) e pode ser usado para estimar ET para outros períodos e localidades. Tanto Kc como ET variam principalmente em função do tipo da cultura e do estágio fenológico. No estágio inicial de desenvolvimento ocorrem baixos valores, uma vez que a cultura cobre parcialmente o solo, sendo E praticamente o único componente de ET. Com o crescimento progressivo da área foliar, elevam-se as taxas de T, aumentando os valores de ET e Kc. Com a queda das folhas no período de senescência da cultura, há diminuição nas taxas de ET e Kc devido à redução de T, tornando novamente E o componente principal de ET.

Os valores de ET e Kc são também influenciados pela fertilidade do solo e ocorrência de pragas, doenças e plantas daninhas, uma vez que esses fatores afetam o desenvolvimento de área foliar (ALLEN et al., 1998). Outros fatores que influenciam ET e Kc são as condições meteorológicas que determinam ET_o, tais como a radiação solar, temperatura e, em menor proporção, a umidade relativa do ar e o vento (ALLEN et al., 1998). Finalmente, chuva e irrigação afetam significativamente ET e Kc, devido ao aumento da taxa de E nos períodos imediatamente após o molhamento da superfície do solo, principalmente em condições de cobertura parcial do solo (JENSEN et al., 1990).

Determinações precisas de ET podem ser obtidas em equipamentos denominados lisímetros, sendo os mais precisos os que usam sistema de

pesagem, com possibilidade de se obter medidas em períodos menores que um dia (HOWELL et al., 1985). No entanto, PEREIRA et al. (1997) apontam que a obtenção de dados de lisímetros é extremamente difícil e onerosa, justificando seu uso apenas em condições experimentais, após a calibração do sistema nas condições do estudo para que se obtenham dados confiáveis.

Diversos estudos visando medir ou estimar o consumo de água de espécies cultivadas já foram realizados nas mais variadas condições ambientais, tais como para arroz e girassol (TYAGI et al., 2000), trigo e milho (KANG et al., 2003) e algumas culturas hortícolas (ORGAZ et al., 2005). Essas pesquisas complementam as sínteses de resultados sobre requerimentos hídricos de cultivos publicadas por DOORENBOS e PRUITT (1977), DOORENBOS e KASSAM (1979), WRIGHT (1982) e, mais recentemente, por ALLEN et al. (1998).

Até o momento, são escassos os trabalhos sobre consumo hídrico do cafeeiro disponíveis na literatura. Em geral, esses trabalhos se baseiam em estimativas indiretas, o que limita a aplicação dos resultados em situações diferentes das que foram desenvolvidos (CARR, 2001). Assim, CLOWES (1984) considerou Kc médio igual a 0,6 para todas as fases fenológicas do cafeeiro irrigado por gotejamento. GUTIERREZ e MEINZER (1994), utilizando o método da razão de Bowen, obtiveram Kc para cafeeiro irrigado por gotejamento de 0,58 para plantas com aproximadamente 12 meses e 0,75 a 0,79 para plantas de 24 a 48 meses.

Por dedução teórica, SANTINATO et al. (1996) recomendaram valores de Kc de 0,6 a 0,8 para plantas de até 12 meses, 0,8 a 1 para plantas de 12 a 36 meses e de 1 a 1,2 para plantas com mais de 36 meses. Para lavouras de café com 2 a 3 m de altura, desenvolvidas sem cobertura nas entrelinhas em clima subúmido, ALLEN et al. (1998) recomendam valores de Kc inicial, médio e final de 0,90, 0,95 e 0,95 respectivamente.

ARRUDA et al. (2000), por monitoramento de água no solo, obtiveram Kc para cafeeiro irrigado por aspersão convencional de 0,73 a 0,75 nos primeiros anos, e de 0,87 a 0,93 aos sete e oito anos. Utilizando lisímetros de percolação, ANTUNES et al. (2000) determinaram Kc de 0,35 para o período mais seco e 0,40 para o mais chuvoso em cafeeiro irrigado por gotejamento em fase de formação (10 a 20 meses de transplântio).

Utilizando lisímetros de pesagem, RIGHI (2004) determinou valores de Kc entre 1,04 e 1,3 para cafeeiro de 12 a 24 meses, adensado (3,5 x 0,9 m), com vegetação nas entrelinhas e irrigado por gotejamento. MARIN et al. (2005), nas mesmas condições de RIGHI (2004) mas avaliando plantas com cinco anos de

idade, obtiveram Kc igual a 1 utilizando o método da razão de Bowen.

O presente trabalho teve como objetivos determinar ET e Kc de cafeeiros desenvolvidos sob irrigação por aspersão e gotejamento, e ET de cafeeiros conduzidos sem irrigação, durante a fase de formação da lavoura, em Londrina (PR).

2. MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado no Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR), em Londrina (PR), em latitude 23°18'S, longitude 51°09'O e altitude de 585 m, durante o período de 7/10/2002 a 31/8/2004. O solo é classificado como Latossolo Vermelho eutroférico, segundo EMBRAPA (1999), e o clima é subtropical úmido (Cfa), segundo a classificação de Köppen, com média anual de temperatura de 21,5 °C e precipitação pluvial que varia de 1.400 a 1.600 mm anuais (IAPAR, 1994).

Foram instalados cinco lisímetros de pesagem de 1,9 m de comprimento, 1,4 m de largura (2,66 m²) e 1,3 m de profundidade, conforme descrito por FARIA et al. (2006). Cafeeiros (*Coffea arabica* L.) da cultivar IAPAR 59 foram plantados em outubro de 2002, no espaçamento 2 x 1,6 m, com duas plantas por cova (0,3 m entre plantas), nos lisímetros e na bordadura, totalizando 115,2 m² (14,4 m x 8 m). A área era circundada por grama e localizada ao lado das Estações Meteorológicas do IAPAR e do Sistema Meteorológico do Paraná (SIMEPAR), conforme apresentado na figura 1.

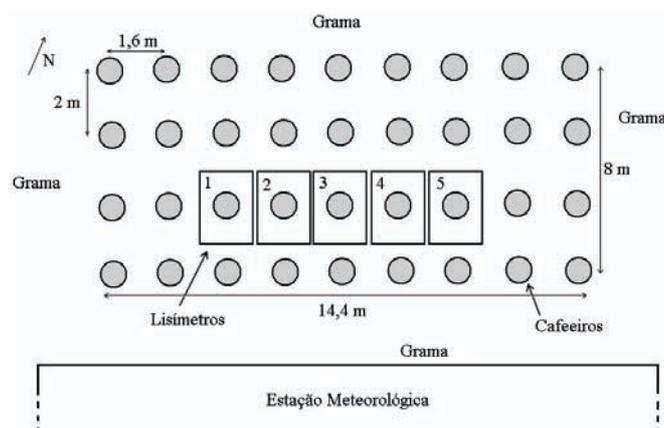


Figura 1. Croqui da área experimental, onde os lisímetros 1 e 2 foram irrigados por aspersão, os lisímetros 3 e 4 não foram irrigados e o lisímetro 5 foi irrigado por gotejamento.

A direção predominante dos ventos na área experimental ocorre no sentido leste-oeste (IAPAR, 1994). Assim, foi possível projetar a área experimental em dimensões reduzidas devido à presença de uma extensa área cultivada com cafeeiros nas direções nordeste, leste e sudeste que serviam como bordadura.

Os lisímetros estão assentados sobre um quadro metálico acoplado a um conjunto de alavancas para redução de massa em aproximadamente 45 vezes a massa total (cerca de 6 t). Possuem sistema de drenagem com reservatórios de armazenamento de água constituídos de dois tubos de PVC, colocados sob os lisímetros, que possibilitam o armazenamento da água percolada pelo perfil do solo. A água de drenagem é contabilizada pelo sistema de pesagem até a abertura dos registros. A variação de massa de cada lisímetro é medida por uma única célula de carga, que emite sinais elétricos com sensibilidade de 2 +/- 10 mV V⁻¹ e trabalha com acuracidade de 0,02% do fundo de escala. O sinal elétrico de cada célula de carga é captado por um sistema de aquisição de dados constituído de um multiplexador (AM416 Relay Multiplexer, Campbell Scientific, Logan, USA) e de uma unidade de armazenamento de dados (CR10X, Campbell Scientific, Logan, USA) para posteriormente ser transferido para um módulo de memória ou computador. A conversão dos sinais elétricos para massa do lisímetro foi realizada por equações de regressão previamente calibradas por FARIA et al. (2006) e o cálculo da lâmina de água foi realizado pela Equação 1:

$$L = \frac{M}{A} \quad (1)$$

na qual L é a lâmina de água (mm), M é a massa de água (kg) e A é a área de superfície do lisímetro (m²). Não houve nenhuma correção nos dados de M ou L devido à diferença entre a área da superfície do lisímetro (2,66 m²) e a área de terreno ocupada pela cova de plantas (3,2 m²), por entender que a superfície do lisímetro representou quase a totalidade (83%) da área ocupada pelas duas plantas da cova.

Foram irrigadas as plantas de dois lisímetros por aspersão e um por gotejamento (iniciado em 4/8/2003), mantendo-se sem irrigação outros dois lisímetros (Figura 1). As irrigações foram realizadas com frequência de uma a duas vezes por semana, visando repor a umidade do solo ao nível próximo da condição de capacidade de campo (CC). Atribuiu-se o valor de 150 mm à lâmina de armazenamento de água na CC, que correspondeu à massa do lisímetro, descontada a drenagem e a evaporação, depois de quatro dias de ocorrência de chuva suficiente para saturar o solo (BERNARDO et al., 2005).

O armazenamento no ponto de murcha permanente (PMP) foi obtido a partir da caracterização física do solo do local (FARIA e CARAMORI, 1986), que mostrou valor de água disponível igual a 10% vol.. Portanto, para a profundidade de 1,3 m do lisímetro utilizado, o valor de capacidade de água disponível (CAD) foi igual a 130 mm e o armazenamento no PMP foi assumido como correspondente à massa do lisímetro na CC descontados 130 mm (20 mm).

A irrigação por aspersão foi simulada aplicando-se manualmente a água em toda a superfície dos lisímetros, utilizando-se um regador plástico, enquanto a irrigação por gotejamento foi realizada em um raio de aproximadamente 0,2 m do tronco do cafeeiro usando um tubo gotejador, de formato circular, alimentado por um reservatório elevado suprido manualmente de água. A irrigação por gotejamento foi iniciada em 4/8/2003, e até essa data, os dados do lisímetro correspondente foram contabilizados em favor do tratamento não irrigado.

Os valores de ET foram determinados pela contabilidade das entradas, saídas e armazenamento de água nos lisímetros de acordo com a Equação 2:

$$ET = P + I \pm ES - D \pm \Delta A \quad (2)$$

em que ET é a evapotranspiração, P a precipitação, I a lâmina de água irrigada, ES o escoamento superficial, D a drenagem e ΔA a variação de armazenamento de água nos lisímetros, todas unidades em mm. O valor de ES foi considerado nulo devido à borda elevada dos lisímetros (cerca de 3 cm) e a precipitação medida na estação meteorológica do IAPAR.

Os valores de Kc dos tratamentos irrigado por aspersão e gotejamento foram determinados de acordo com a Equação 3:

$$Kc = \frac{ET}{ET_0} \quad (3)$$

sendo Kc o coeficiente de cultivo (adimensional), ET a evapotranspiração do cultivo e ET_0 a evapotranspiração de referência (ambos em mm). Valores diários de ET_0 pelo método Penman-Monteith foram calculados pelo programa REF-ET (ALLEN, 2000), usando dados diários da estação meteorológica do SIMEPAR. O cálculo de ET_0 horária foi realizado pelo método ASCE Penman-Monteith (WALTER et al., 2000) utilizando dados horários da estação meteorológica do SIMEPAR.

Os valores de ET dos diferentes tratamentos, ET_0 e Kc foram agrupados em médias referentes às estações do ano. Os valores médios de ET_0 correspondem à média de todos os valores observados

no período, enquanto as médias de ET foram obtidas com um número menor de dados, considerando que houve falhas de medidas. Consequentemente, Kc foi determinado somente nos dias em que houve medidas de ET e sua média foi resultante de tais determinações. Todavia, os valores de ET e Kc obtidos correspondem à média de mais de 50% da duração do período observado.

Periodicamente, foi avaliada a altura de plantas e calculado o índice de área foliar (IAF) das duas plantas de cada lisímetro. Determinou-se a altura medindo-se com uma trena o comprimento do ramo ortotrópico a partir do nível do solo. O valor de IAF foi obtido pela razão entre a área de folhas e área do terreno ocupado pelas plantas analisadas. A área de folhas foi estimada pelo produto entre o número de folhas e a área média de dez folhas estimada pela Equação 4, calibrada previamente por FLUMIGNAN et al. (2008), utilizando uma amostra de 60 folhas obtida nas plantas de fora dos lisímetros. Na calibração, o resultado do produto entre comprimento e largura das folhas, juntamente com a área foliar medida pelo integrador de área foliar LI-COR (modelo 3100), foram submetidos à regressão linear para obter a seguinte relação ($R^2 = 0,99$):

$$AF = 0,6751(C \times L) + 0,3533 \quad (4)$$

sendo AF a área da folha (cm^2), C o comprimento da folha e L a largura da folha (ambos em cm).

O manejo da cultura foi realizado segundo recomendações do Programa Café do IAPAR. O controle de plantas daninhas, inclusive nas entrelinhas, pragas e doenças, assim como a aplicação de fertilizantes e a correção da acidez do solo, foram realizados sempre que necessário.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Do início ao fim do experimento, as plantas cresceram em torno de 0,2 m até 1,1 m de altura e de 0,02 a 5 de IAF, com maiores incrementos no segundo ano (Figura 2).

As taxas de crescimento em altura se diferenciaram apenas no período entre maio e agosto de 2004, quando o cafeeiro irrigado por gotejamento cresceu apenas 0,008 m, enquanto as plantas irrigadas por aspersão e as não-irrigadas cresceram 0,072 e 0,064 m respectivamente (Figura 2A). No período entre fevereiro e agosto de 2004, no cafeeiro irrigado por gotejamento houve maior crescimento de área foliar, aumentando IAF de 2,19 para 5,43, quando comparado aos cafeeiros irrigados por aspersão e os não-irrigados que cresceram IAF de 2,2 para 4,65 e 5 respectivamente (Figura 2B).

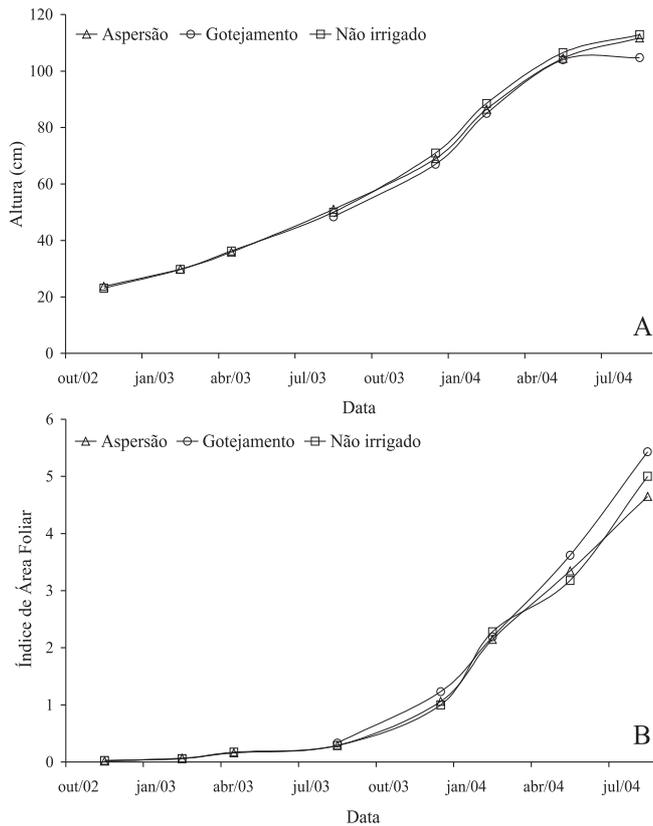


Figura 2. Altura (A) e índice de área foliar (B) de cafeeiro irrigado por aspersão, gotejamento e não irrigado na fase de formação em Londrina (PR).

O crescimento semelhante em altura e IAF durante o período analisado pode ser atribuído às condições de suprimento hídrico satisfatório (Figura 3), mesmo no tratamento não irrigado, que esteve com umidade do solo acima de 50% da fração de água disponível durante todo o período estudado devido à ocorrência de chuvas, enquanto o tratamento sob aspersão foi mantido com umidade do solo próxima ou acima da CC pela irrigação e chuva. O tratamento irrigado por gotejamento esteve com umidade do solo satisfatória durante o período em que não foi irrigado (7/10/2002 a 4/8/2003), devido à ocorrência de chuvas, e durante 4/8/2003 a 31/8/2004, quando a irrigação e chuva mantiveram a umidade do solo próxima ou acima da CC.

Os valores de ET nos três tratamentos seguiram a variação da E_{To} durante o período analisado (Figura 4A), com maiores valores de setembro a abril e menores de maio a agosto. O tratamento sob aspersão resultou em taxas mais elevadas de ET, sendo próximas ou superiores a E_{To} durante quase todo o período experimental. Valores intermediários de ET ocorreram no tratamento sob gotejamento e as menores taxas foram observadas no tratamento não irrigado. Esses valores podem ser

explicados pela relação direta entre a evaporação e umidade na camada superficial do solo, que foi maior no tratamento irrigado por aspersão, intermediário no gotejamento e menor no tratamento sem irrigação.

A demanda atmosférica média anual, expressa por E_{To} , foi similar entre o primeiro e segundo ano (3,2 e 3,3 mm dia^{-1} respectivamente), com maiores valores durante a primavera e o verão (3,5 a 4,2 mm dia^{-1}), intermediários no outono (2,8 a 3,2 mm dia^{-1}) e menores no inverno (2,2 a 2,4 mm dia^{-1}) (Tabela 1). O tratamento irrigado por gotejamento com ET média anual de 2,9 mm dia^{-1} , obtida somente no segundo ano, foi 15% inferior ao tratamento com aspersão e 15% superior ao tratamento não irrigado. A média de ET aumentou do primeiro para o segundo ano no tratamento com aspersão, de 3,1 para 3,4 mm dia^{-1} , e no tratamento não irrigado, de 2,2 para 2,5 mm dia^{-1} , devido ao crescimento da área foliar (Figura 2). Consequentemente, o consumo hídrico médio do tratamento irrigado por aspersão foi de 43% e 36% mais alto que o tratamento não irrigado para o primeiro e segundo ano, respectivamente. Sob aspersão, gotejamento e sem irrigação, os maiores valores de ET ocorreram na primavera e verão (3,1 a 4,7 mm dia^{-1} , 2,9 a 4,2 mm dia^{-1} e 2,3 a 3,6 mm dia^{-1} , respectivamente), foram intermediários no outono (3,2 a 3,4 mm dia^{-1} , 2,9 mm dia^{-1} e 1,8 a 2,6 mm dia^{-1} , respectivamente) e menores no inverno (1,8 a 2,4 mm dia^{-1} , 1,7 mm dia^{-1} e 1,2 a 1,4 mm dia^{-1} , respectivamente).

Na primavera do primeiro ano, as médias de ET dos tratamentos irrigado por aspersão e não irrigado foram muito próximas devido ao grande volume de chuva (284 mm), que manteve a umidade do solo de ambos os tratamentos próxima da CC (Figura 3). No verão ocorreu fenômeno semelhante, porém devido a maior quantidade de eventos de irrigação os tratamentos se diferenciaram ligeiramente devido a maior quantidade de E no tratamento irrigado por aspersão. No outono e inverno, ocorreram poucas chuvas e os tratamentos se diferenciaram devido ao efeito da irrigação.

A média anual de Kc do tratamento irrigado por aspersão foi igual a 0,99 e 1,03, respectivamente, no primeiro e segundo ano e 0,92 para o tratamento irrigado por gotejamento no segundo ano. Da mesma forma que obtido para ET, os valores de Kc variaram durante o ano e foram mais elevados no tratamento com aspersão e menores no gotejamento (Figura 4, Tabela 1). Em condição de irrigação por aspersão, as médias de Kc no primeiro ano aumentaram de 0,69 na primavera para 1,08 no verão e 1,06 no outono, elevando esse valor durante o inverno para 1,14.

Tabela 1. Médias de evapotranspiração de referência (ET₀), evapotranspiração (ET) e coeficientes de cultivo (K_c) de cafeeiros irrigado por aspersão (A), gotejamento (G) e não irrigado (NI), durante estações do ano agrícola na fase de formação da lavoura em Londrina (PR)

Ano agrícola	Estação	ET ₀	ET			K _c	
			A	G	NI	A	G
mm dia ⁻¹							
2002/2003							
(1.º ano)	Primavera	3,8	3,1	-	3,0	0,69	-
	Verão	3,5	3,7	-	2,7	1,08	-
	Outono	3,2	3,4	-	1,8	1,06	-
	Inverno	2,2	2,4	-	1,2	1,14	-
	Média	3,2	3,1	-	2,2	0,99	-
2003/2004							
(2.º ano)	Primavera	3,9	3,9	2,9	2,3	1,08	0,85
	Verão	4,2	4,7	4,2	3,6	1,15	1,05
	Outono	2,8	3,2	2,9	2,6	1,12	1,07
	Inverno	2,4	1,8	1,7	1,4	0,79	0,74
	Média	3,3	3,4	2,9	2,5	1,03	0,92

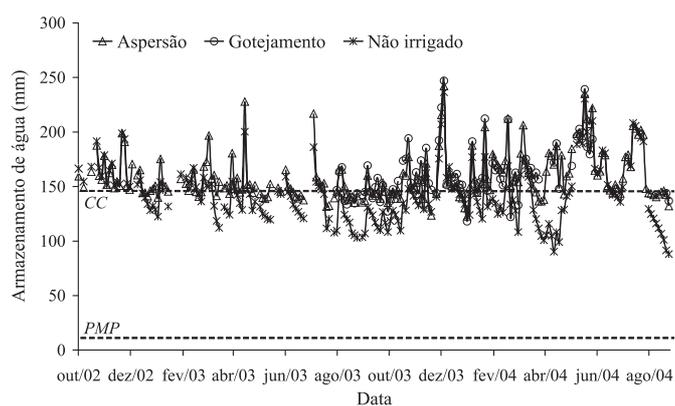


Figura 3. Variação do armazenamento mínimo diário de água no perfil do solo determinado com o uso de lisímetros de pesagem na fase de formação dos cafeeiros em Londrina (PR).

No segundo ano, os valores de K_c continuaram acima de 1 no tratamento sob aspersão, 1,08 na primavera, 1,15 no verão e 1,12 no outono, decrescendo para 0,79 no inverno. Comportamento similar ocorreu no tratamento irrigado por gotejamento, determinado durante o segundo ano, em que K_c aumentou de 0,85 na primavera para 1,05 no verão e 1,07 no outono, decrescendo para 0,74 no inverno.

Os valores de K_c determinados no primeiro ano foram atribuídos praticamente às perdas por E, uma vez que a cultura cobria pequena porção do terreno. O aumento das médias de K_c nos dois tratamentos irrigados durante o segundo ano está

relacionado, especialmente, à evolução do IAF, que aumentou continuamente nesse período, aumentando T por consequência (Figura 2).

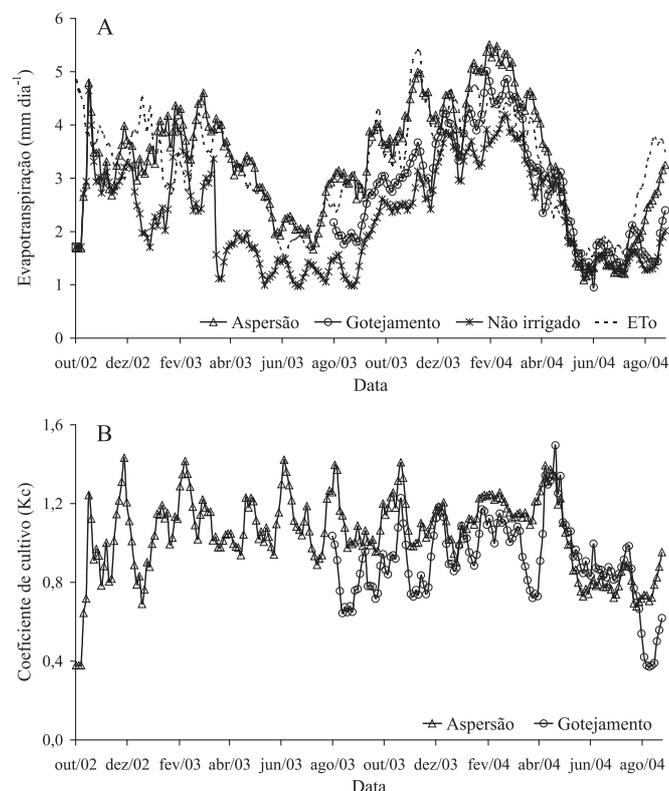


Figura 4. Evapotranspiração de referência (ET₀) e evapotranspiração (A), e coeficientes de cultivo (B) de cafeeiros sob aspersão, gotejamento e não irrigado, obtidos por média móvel de 15 dias, durante a fase de formação da lavoura em Londrina (PR).

Apesar da continuidade de crescimento da área foliar, durante o inverno, em ambos os tratamentos irrigados, ocorreu queda nos valores de K_c , o que pode ser atribuída à menor atividade fisiológica da planta durante essa estação, considerada como fase de dormência do cafeeiro (CAMARGO e CAMARGO, 2001). Já a diferença dos valores de K_c no tratamento sob aspersão, em relação ao gotejamento, pode ser atribuída a maior quantidade de E no tratamento irrigado por aspersão (JENSEN et al., 1990).

Os valores de K_c determinados no presente trabalho para aspersão (0,99 e 1,03, para o primeiro e segundo ano, respectivamente) foram maiores que os sugeridos por SANTINATO et al. (1996) para população de plantas semelhante no primeiro ano (0,6 a 0,8) e próximos dos sugeridos no segundo ano (0,8 a 1). Foram maiores também em relação aos apresentados por ARRUDA et al. (2000) (0,73 a 0,75 nos primeiros anos). A dedução teórica de SANTINATO et al. (1996) e o método de monitoramento de água no solo usado por ARRUDA et al. (2000) podem incluir simplificações que levaram os autores a subestimar os valores de K_c , uma vez que a lisimetria de pesagem utilizada neste trabalho foi de alta precisão de medida (FARIA et al., 2006).

Para as plantas sob gotejamento, o valor de K_c sugerido por SANTINATO et al. (1996) para o segundo ano, concorda com o valor constatado neste trabalho (0,92). Ainda para gotejamento, o valor de K_c obtido por GUTIERREZ e MEINZER (1994) para plantas com aproximadamente 12 meses (0,58) foi menor que o verificado neste trabalho para plantas de idade semelhante (0,85), correspondente à média da primavera do segundo ano (Tabela 1).

Além dos valores de K_c para cafeeiro sob gotejamento serem menores que os observados neste trabalho, CLOWES (1984) recomendou K_c único (0,6) para todas as fases fenológicas, o que foi comprovado ser incorreto pelos resultados deste estudo, visto que os valores de K_c variam durante o desenvolvimento fenológico da cultura, tanto na aspersão como no gotejamento (Tabela 1). ANTUNES et al. (2000) também determinaram valores inferiores de K_c (0,35 e 0,4 para o período mais seco e mais chuvoso, respectivamente) em cafeeiros irrigados por gotejamento de 10 a 20 meses, comparados com os obtidos neste trabalho (0,74 a 1,07).

Também sob gotejamento, RIGHI (2004) determinou valores superiores de K_c (1,04 a 1,3) para cafeeiros de 12 a 24 meses, comparados com os obtidos para condições semelhantes no presente trabalho (0,74 a 1,07). A diferença pode ser atribuída à manutenção da cobertura vegetal na entrelinha do cafeeiro no experimento de RIGHI (2004), o que aumentou substancialmente T e, conseqüentemente, K_c .

Além do crescimento da área foliar e da variação da demanda atmosférica, as diferenças nas médias de ET e K_c dos tratamentos foram decorrentes da frequência de molhamento e características da distribuição de água de irrigação, concordando com JENSEN et al. (1990). Para exemplificar como a irrigação influencia o consumo hídrico, na Figura 5 verifica-se o monitoramento diário nos tratamentos sob aspersão, gotejamento e não irrigado em dia de primavera, quando os tratamentos estavam com IAF médio de 0,46.

A variação positiva na massa do lisímetro (Figura 5A) foi resultado da irrigação de 15 mm, entre 13 e 14 h no tratamento com aspersão e entre 13 e 15 h no tratamento com gotejamento. No período subsequente à irrigação, ocorreu maior decréscimo de massa no lisímetro sob aspersão e intermediário no lisímetro sob gotejamento, em relação ao não irrigado, devido ao aumento de E nos tratamentos irrigados.

Antes da irrigação, no tratamento irrigado por aspersão as taxas de ET foram mais altas que os outros tratamentos porque a superfície do solo estava mais úmida devido à irrigação realizada três dias antes (Figura 5B). Após a irrigação, as taxas horárias de ET no tratamento irrigado por aspersão foram mais elevadas que ET_o . Por outro lado, no tratamento irrigado por gotejamento ocorreu ligeiro aumento de ET , mas que pouco diferiu das taxas do tratamento não irrigado.

No fim do dia, ET_o foi igual a 4,97 mm e ET foi de 4,9, 2,34 e 1,51 mm para os tratamentos sob aspersão, gotejamento e não irrigado, respectivamente (Figura 5C). Nessa data os valores de K_c foram de 0,99 e 0,47 para os tratamentos com aspersão e gotejamento respectivamente.

As elevadas taxas de ET no tratamento sob aspersão podem ser atribuídas, principalmente, ao aumento de E causado pelo molhamento de toda a superfície do solo, já que IAF era pequeno (Figura 2B). Assim, a irrigação por aspersão resultou em baixa resistência ao fluxo evaporativo da água recém-aplicada na superfície do solo e da folhagem, aumentando E , e em baixa resistência estomática, aumentando T , porém em menor proporção devido à baixa cobertura do solo. No tratamento irrigado por gotejamento, as taxas de ET foram menores, porque E foi menor em vista da melhor eficiência de aplicação de água deste método. No tratamento não irrigado, a superfície do solo seca e a pequena área foliar resultaram em baixos valores de E e T respectivamente, conforme detectado pelo pequeno decréscimo de massa no lisímetro durante o dia (Figura 5A).

De maneira geral, o consumo hídrico foi mais acentuado durante as horas de maior disponibilidade energética (Figura 5B). Ainda na Figura 5, as perdas de massa durante o período noturno podem ser atribuídas à ET produzida pela energia armazenada no sistema e ao fator aerodinâmico, enquanto os ganhos de massa podem ser devidos ao orvalho. Também a imprecisão do sistema de pesagem dos lisímetros, que é de 0,08 mm, pode ter sido responsável pelas oscilações de massa.

O consumo hídrico nos dias subsequentes à irrigação foi decrescente à medida que houve o secamento da superfície do solo nos tratamentos irrigados (Figura 6). O valor de Kc do tratamento sob aspersão foi de 0,65 no dia anterior à irrigação, aumentou para 0,99 no dia da irrigação e 1,09 no dia seguinte, devido à manutenção da umidade na superfície do solo, e decresceu para 0,67 no segundo dia após a irrigação, pela perda de umidade na camada superficial do solo em decorrência de E. No tratamento sob gotejamento as taxas intermediárias de ET durante o período foram ligeiramente superiores ao tratamento não irrigado. Sob gotejamento, o valor de Kc foi de 0,38 no dia anterior à irrigação, aumentou para 0,47 no dia da irrigação, decresceu para 0,43 no dia seguinte e para 0,35 no segundo dia após a irrigação. No tratamento não irrigado, observaram-se as menores taxas de ET devido à menor disponibilidade hídrica na camada superficial do solo.

O consumo hídrico dos tratamentos variou também em função de ETo, ocorrendo comportamentos diferenciados em dias com demanda evaporativa elevada e com demanda evaporativa baixa. Como demonstrado nas figuras 5 e 6, em condições de demanda evaporativa elevada, no tratamento irrigado por aspersão ocorreram maiores taxas de ET que no tratamento irrigado por gotejamento e não irrigado, por não haver restrição do solo ao fluxo evaporativo devido ao molhamento de toda a superfície do solo, ao contrário do tratamento irrigado por gotejamento que limitava a área a ser molhada na irrigação e ao tratamento não irrigado cuja primeira camada do solo permanecia seca, restringindo E. Por outro lado, em dias com demanda evaporativa baixa, ET de todos os tratamentos tendeu a se aproximar de ETo e, além disso, os tratamentos pouco se diferenciaram, uma vez que o solo foi capaz de suprir a demanda hídrica, mesmo no tratamento não irrigado.

Em geral, a ocorrência de chuva fez com que ET dos tratamentos se igualassem devido à diminuição da demanda atmosférica e ao efeito do molhamento da superfície cultivada. Nos dias subsequentes ocorreram elevadas taxas de ET, da mesma forma que no tratamento irrigado por aspersão nas Figuras 5 e 6.

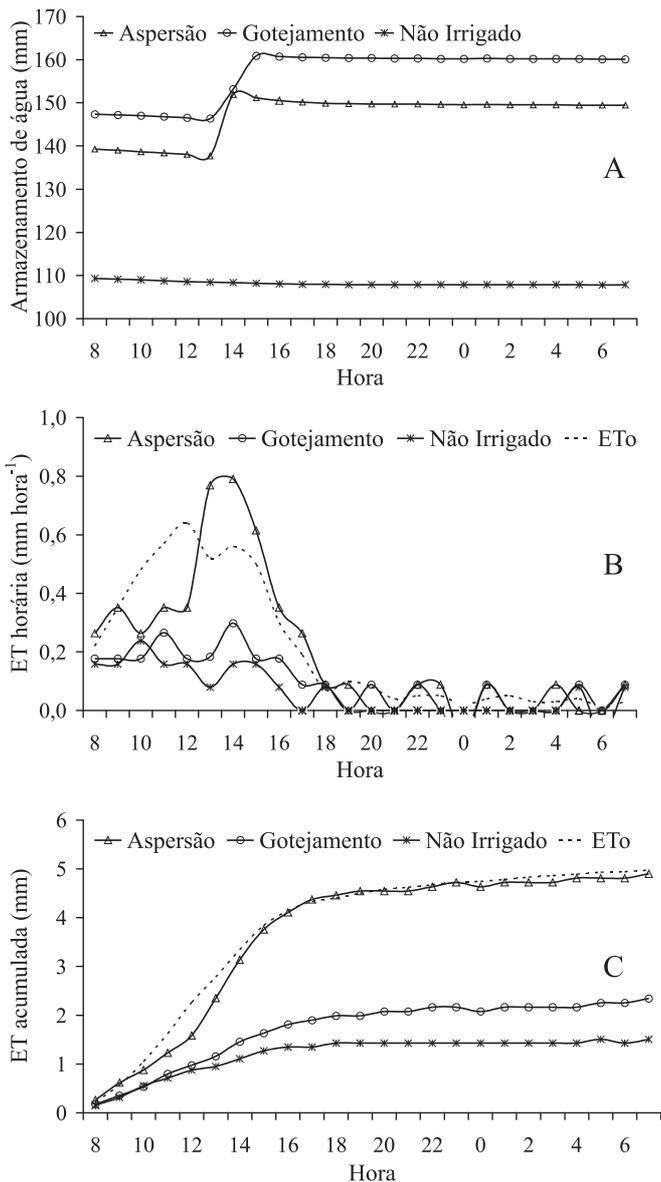


Figura 5. Armazenamento de água no lisímetro (A), evapotranspiração horária (B) e evapotranspiração acumulada (C) de cafeeiro em fase de formação irrigado por aspersão, gotejamento e não irrigado e evapotranspiração de referência (ETo), durante o dia 22/09/2003, quando foi aplicada lâmina de irrigação igual a 15 mm em Londrina (PR).

Esse efeito ocorreu na primavera do primeiro ano, e fez com que as médias de ET do tratamento irrigado por aspersão e o não irrigado fossem bastante próximas (Tabela 1). Esse efeito também ocorreu com a alta frequência de chuvas de outubro de 2003 a março de 2004, o que pode explicar o aumento de ET média do tratamento não irrigado durante o verão e outono do segundo ano (Tabela 1), em resposta ao aumento da área foliar (Figura 2B).

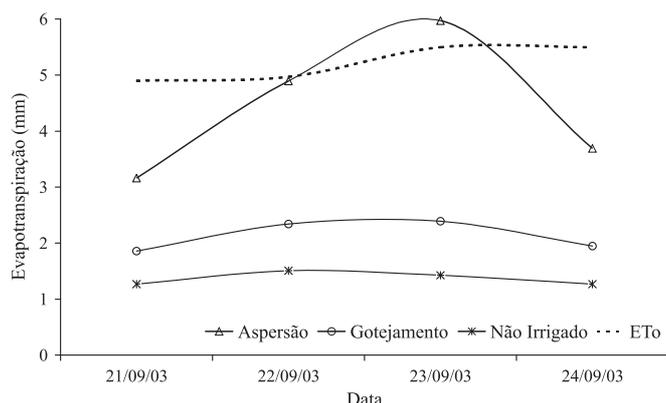


Figura 6. Curso diário da evapotranspiração de cafeeiros em fase de formação irrigados por aspersão, gotejamento e não irrigados e evapotranspiração de referência (ETo) durante quatro dias sucessivos sem chuva (21/9/2003 a 24/9/2003) com irrigação de lâmina igual a 15 mm, em 22/9/2003 em Londrina (PR).

4. CONCLUSÕES

1. Os valores de ET e Kc dos tratamentos analisados variaram em função do método de irrigação, frequência de chuvas, demanda da atmosfera e evolução da área foliar;

2. Durante a fase de formação da lavoura em Londrina (PR), no tratamento irrigado por aspersão ocorreram os maiores valores médios anuais de ET (3,1 e 3,4 mm dia⁻¹ no primeiro e segundo ano respectivamente), seguido do gotejamento (2,9 mm dia⁻¹ no segundo ano) e do não irrigado (2,2 e 2,5 mm dia⁻¹ no primeiro e segundo ano respectivamente);

3. O valor médio anual de Kc foi maior para o tratamento irrigado por aspersão (0,99 e 1,03 no primeiro e segundo ano respectivamente) e menor para o irrigado por gotejamento (0,92 no segundo ano).

REFERÊNCIAS

ALLEN, R.G. A Penman for all seasons. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Reston, v.112, n.4, p.348-368, 1986.

ALLEN, R.G. **REF-ET**: reference evapotranspiration calculation software. Version 2.0. Moscow: University of Idaho, 2000.

ALLEN, R.G.; PEREIRA, L.S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration**: guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998. 301p. (FAO Irrigation and Drainage Paper 56)

ANTUNES, R.C.B.; MANTOVANI, E.C.; COSTA, L.C.; RENA, A.B.; ALVARENGA, A.P. Determinação da evapotranspiração da cultura do cafeeiro em formação. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 1., 2000, Poços de Caldas. **Anais...** Brasília: Embrapa Café/MINASPLAN, 2000. v.2, p.810-813.

ARRUDA, F.B.; IAFEE, A.; SAKAI, E.; CALHEIROS, R.O. Resultados anuais do coeficiente de cultura do cafeeiro em um ensaio em Pindorama/SP. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 1., 2000, Poços de Caldas. **Anais...** Brasília: Embrapa Café/MINASPLAN, 2000. v.2, p.790-793.

BERNARDO, S.; SOARES, A.A.; MANTOVANI, E.C. **Manual de irrigação**. 7.ed. Viçosa: Editora UFV, 2005. 611p.

CAMARGO, A.P.; CAMARGO, M.B.P. Definição e esquematização das fases fenológicas do cafeeiro arábica nas condições tropicais do Brasil. **Bragantia**, Campinas, v.60, n.1, p.65-68, 2001.

CARR, M.K.V. The water relations and irrigation requirements of coffee. **Experimental Agriculture**, Cambridge, v.37, n.1, p.1-36, 2001.

CLOWES, M.S.J. Drip irrigation on coffee. **Zimbabwe Agricultural Journal**, Harare, v.81, n.6, p.215-219, 1984.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. **Yield response to water**. Rome: FAO, 1979. 193p. (FAO Irrigation and Drainage Paper 33)

DOORENBOS, J.; PRUITT, W.O. **Crop water requirements**. Rome: FAO, 1977. 144p. (FAO Irrigation and Drainage Paper 24)

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPq, 1999. 412p.

FARIA, R.T.; CAMPECHE, L.F.S.M.; CHIBANA, E.Y. Construção e calibração de lisímetros de alta precisão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.10, n.1, p.237-242, 2006.

FARIA, R.T.; CARAMORI, P.H. Caracterização físico-hídrica de um Latossolo Roxo distrófico do município de Londrina, PR. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.21, n.12, p.1303-1311, 1986.

FLUMIGNAN, D.L.; ADAMI, M.; FARIA, R.T. Área foliar de folhas íntegras e danificadas de cafeeiro determinada por dimensões foliares e imagem digital. **Coffee Science**, Lavras, v.3, n.1, p.1-6, 2008.

GUTIERREZ, M.V.; MEINZER, F.C. Estimating water use and irrigation requirements of coffee in Hawaii. **Journal of the American Society for Horticultural Science**, Alexandria, v.119, n.3, p.652-657, 1994.

HOWELL, T.A.; McCORMICK, R.L.; PHENE, C.J. Design and installation of large weighing lysimeters. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, Saint Joseph, v.28, n.1, p.106-117, 1985.

IAPAR. **Cartas climáticas do Estado do Paraná**. Londrina: IAPAR, 1994. 49p. (Documento 18)

JENSEN, M.E.; BURMA, R.D.; ALLEN, R.G. **Evapotranspiration and irrigation water requirements**. New York: American Society of Civil Engineers, 1990. 332p. (ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice 70)

KANG, S.Z.; GU, B.J.; DU, T.S.; ZHANG, J.H. Crop coefficient and ratio of transpiration to evapotranspiration of winter wheat and maize in a semi-humid region. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.59, n.3, p.239-254, 2003.

MARIN, F.R.; ANGELOCCI, L.R.; RIGHI, E.Z.; SENTELHAS, P.C. Evapotranspiration and irrigation requirements of a coffee plantation in southern Brazil. **Experimental Agriculture**, Cambridge, v.41, n.2, p.187-197, 2005.

ORGAZ, F.; FERNÁNDEZ, M.D.; BONACHELA, S.; GALLARDO, M.; FERERES, E. Evapotranspiration of horticultural crops in an unheated plastic greenhouse. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.72, n.2, p.81-96, 2005.

PEREIRA, A.R.; VILLA NOVA, N.A.; SEDIYAMA, G.C. **Evapotranspiração**. Piracicaba: ESALQ, 1997. 183p.

RIGHI, E.Z. **Balanco de energia e evapotranspiração de cafezal adensado em crescimento sob irrigação localizada**. 2004. 168f. Tese (Doutorado em Física do Ambiente Agrícola) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”/USP, Piracicaba.

SANTINATO, R.; FERNANDES, A.L.T.; FERNANDES, D.R. **Irrigação na cultura do café**. Campinas: Arbore, 1996. 146p.

SMITH, M. **Report on the expert consultation on revision of FAO methodologies for crop water requirements**. Rome: FAO, 1991. 45p.

TYAGI, N.K.; SHARMA, D.K.; LUTHRA, S.K. Determination of evapotranspiration and crop coefficients of rice and sunflower with lysimeters. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.45, n.1, p.41-54, 2000.

WALTER, I.A.; ALLEN, R.G.; ELLIOTT, R.; JENSEN, M.E.; ITENFISU, D.; MECHAM, B.; HOWELL, T.A.; SNYDER, R.; BROWN, P.; ECHINGS, S.; SPOFFORD, T.; HATTENDORF, M.; CUENCA, R.H.; WRIGHT, J.L.; MARTIN, D. ASCE's standardized reference evapotranspiration equation. In: NATIONAL IRRIGATION SYMPOSIUM, 4., 2000, Phoenix. **Proceedings...** Phoenix: American Society of Agricultural Engineers, 2000. v.1, p.209-215.

WRIGHT, J.L. New evapotranspiration crop coefficients. **Journal of the Irrigation and Drainage Division**, New York, v.108, n.2, p.57-74, 1982.