

INFLUÊNCIA DE ELEMENTOS METEOROLÓGICOS NA EVAPOTRANSPIRAÇÃO ESTIMADA PELO IRRIGÂMETRO

**LUAN BRIOSCHI GIOVANELLI¹; RUBENS ALVES DE OLIVEIRA¹; JAIR DA
COSTA OLIVEIRA FILHO²; GILBERTO CHOYAKU SEDIYAMA¹; PAULO
ROBERTO CECON³ E JÚLIO CÉSAR MACHADO BAPTESTINI¹**

¹ Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa – UFV, Campus Viçosa, 36570-900, Viçosa, Minas Gerais, Brasil, luanbg22@hotmail.com / rubens@ufv.br / g.sedyama@ufv.br / jcbaptestini@yahoo.com.br.

² Departamento de Agronomia, Universidade Federal de Tocantins – UFT, Campus Gurupi, 77402-970, Gurupi, Tocantins, Brasil, jair@mail.uft.edu.br.

³ Departamento de Estatística, Universidade Federal de Viçosa – UFV, Campus Viçosa, 36570-900, Viçosa, Minas Gerais, Brasil, cecon@ufv.br.

1 RESUMO

O Irrigâmetro é um aparelho utilizado no manejo da água de irrigação, sendo capaz de estimar diretamente a evapotranspiração da cultura. Essa estimativa é dependente dos elementos meteorológicos e de suas inter-relações, associados ao correto ajuste do aparelho. Nesse contexto, o objetivo deste estudo foi avaliar os efeitos da temperatura máxima e mínima do ar, umidade relativa média do ar, velocidade do vento média e radiação solar global na evapotranspiração estimada pelo Irrigâmetro (ET_I), nas condições climáticas do sul do estado do Tocantins, operando com diferentes alturas de água dentro do evaporatório, para as estações do ano. O experimento foi montado num delineamento inteiramente casualizado, com seis alturas da água no evaporatório representando os tratamentos, com três repetições. Os elementos meteorológicos envolvidos foram obtidos numa estação meteorológica automática. A umidade relativa e a radiação solar apresentaram alta correlação com a evapotranspiração estimada pelo Irrigâmetro em todas as estações do ano. Por outro lado, a temperatura mínima e a velocidade do vento tiveram pouca influência sobre a ET_I.

Palavras-chave: agricultura irrigada, manejo da irrigação, meteorologia agrícola.

**GIOVANELLI, L. B.; OLIVEIRA, R. A.; OLIVEIRA FILHO, J. C.; SEDIYAMA, G.
C.; CECON, P. R.; BAPTESTINI, J. C. M.
METEOROLOGICAL ELEMENTS ON EVAPOTRANSPIRATION ESTIMATED BY
IRRIGAMETER**

2 ABSTRACT

Irrigameter is a device used in water management for irrigation that is able to directly estimate crop evapotranspiration. This estimate depends on weather elements and their interrelations associated with the correct device setting. In this context, this research aimed to evaluate the effects of maximum and minimum air temperature, average relative air humidity, average wind speed, and global solar radiation on evapotranspiration estimated by Irrigameter (ET_I)

under Southern Tocantins, Brazil, climatic conditions, operating at different water heights inside the evaporator according to the season of the year. The experiment was arranged in a completely randomized design with six water heights in the evaporator as treatments with three replicates. Meteorological elements involved were obtained in an automatic meteorological station. Relative humidity and solar radiation showed a high correlation with evapotranspiration estimated by Irrigameter in all seasons of the year. On the other hand, the minimum temperature and the wind speed had little effect on the ET_1 .

Keywords: irrigated agriculture, irrigation management, agricultural meteorology.

3 INTRODUÇÃO

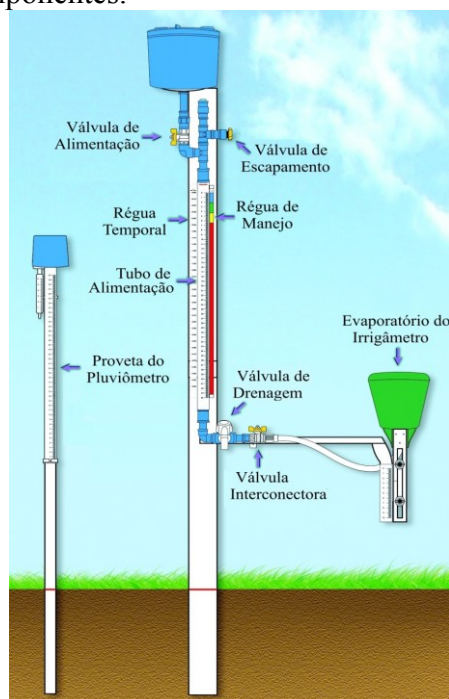
Na agricultura irrigada, a determinação do consumo de água pelas culturas pode ser feita a partir de medições efetuadas no solo, na planta e na atmosfera. Os métodos baseados em medições no solo fundamentam-se na determinação do seu teor de água; os que utilizam medições na planta consideram o monitoramento do seu potencial hídrico e avaliações da resistência estomática, da temperatura da folha, entre outros; já os métodos baseados no clima consideram desde simples medições da evaporação da água num tanque, como o Classe “A”, até complexas equações para estimativa da evapotranspiração (ROCHA et al., 2003).

Segundo Caixeta (2009), a determinação da evapotranspiração é muito utilizada no manejo da irrigação, por causa da facilidade de cálculo da necessidade hídrica das culturas, da menor exigência de mão-de-obra e da maior rapidez na tomada de decisão.

O consumo de água envolvido no processo de evapotranspiração é influenciado por diversos fatores: índice de área foliar e a quantidade de água prontamente disponível no solo assim como a ação combinada dos seguintes elementos meteorológicos: radiação solar, temperatura e umidade relativa do ar e velocidade do vento. É comum que as taxas de evaporação e transpiração elevem-se com o aumento da radiação solar, temperatura do ar, velocidade do vento e índice de área foliar e com a diminuição da umidade relativa do ar (DOORENBOS; PRUITT, 1977; MEDEIROS, 2002).

Face ao exposto, a escolha do método mais apropriado para estimativa da evapotranspiração depende da disponibilidade de dados meteorológicos, do nível de precisão exigido, da finalidade – se o manejo da irrigação é em nível de propriedade agrícola ou pesquisa – e do custo de aquisição dos equipamentos (OLIVEIRA et al., 2011). O Irrigâmetro, inventado e desenvolvido na Universidade Federal de Viçosa (UFV) por uma equipe de pesquisadores do Departamento de Engenharia Agrícola, é um aparelho evapo-pluviométrico utilizado no manejo da irrigação que combina o método da estimativa da evapotranspiração com a disponibilidade de água no solo para a cultura (MONTES, 2008). É uma alternativa de simples operação – a qual consiste simplesmente em abertura e fechamento de válvulas nele existentes, obedecendo uma sequência predefinida – e economicamente viável aos produtores rurais, haja vista que a aplicação da lâmina necessária à cultura evita o consumo desnecessário de energia, evitando a degradação do meio ambiente e refletindo na redução dos custos de produção e aumento da produtividade e qualidade das culturas (MONTES, 2008).

O aparelho e seus componentes são apresentados na figura abaixo.

Figura 1. Irrigâmetro e seus componentes.

Fonte: Oliveira e Ramos (2008).

O Irrigâmetro estima diretamente a evapotranspiração da cultura por meio da evaporação da água presente no evaporatório do aparelho e indica o valor da lâmina necessária à cultura no tubo de alimentação, o momento de irrigar na régua de manejo – ajustada de acordo com a cultura a ser irrigada e o tipo de solo – e o tempo de irrigação na régua temporal – ajustada para cada sistema de irrigação – ou a velocidade de deslocamento na régua percentual (se a cultura for irrigada por pivô central) do sistema de irrigação (OLIVEIRA et al., 2008).

Oliveira et al. (2008) e Tagliaferre et al. (2012) enfatizam que o aparelho tem se mostrado capaz de estimar a evapotranspiração com boa precisão – superior a um milésimo de milímetro –, sendo esse processo dependente diretamente dos elementos meteorológicos e suas inter-relações, associados ao correto ajuste do aparelho.

O estudo da influência dos elementos meteorológicos no processo de estimativa da evapotranspiração pelo Irrigâmetro torna-se importante para o entendimento da correlação entre esses elementos e de sua influência em condições climáticas distintas. Esse entendimento possibilita verificar a necessidade ou não de se fazer ajustes na altura do evaporatório do aparelho para estimar a evapotranspiração da cultura nos seus diferentes estádios de desenvolvimento, contribuindo para a recomendação mais segura da tecnologia do Irrigâmetro em regiões com condições climáticas semelhantes às do local de avaliação do aparelho.

Segundo Furtado et al. (2002), a correlação simples permite apenas avaliar a magnitude e o sentido da associação entre duas variáveis quaisquer; portanto, não permite inferências sobre a causa e o efeito, impossibilitando o conhecimento de qual tipo de associação governa o par de variáveis.

Wright, em 1921, propôs um método de desdobramento dos coeficientes de correlação, denominado análise de trilha ou análise de caminhamento. Tal análise permite

particionar o coeficiente de correlação em efeitos diretos e indiretos de variáveis explicativas, sobre uma variável principal (CRUZ; CARNEIRO, 2003).

Nesse contexto, o objetivo deste estudo foi avaliar os efeitos da temperatura máxima, temperatura mínima e umidade relativa do ar, da velocidade do vento e da radiação solar na evapotranspiração estimada pelo Irrigâmetro (ET_I), nas condições climáticas do sul do Estado do Tocantins, operando com diferentes alturas da água dentro do evaporatório.

4 MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi conduzido numa área experimental da Universidade Federal do Tocantins (UFT) no Campus Universitário de Gurupi, TO, com coordenadas geográficas: latitude de 11° 45' S; longitude de 49° 03' W e altitude de 287 m. Nessa área foram instalados 18 Irrigâmetros (Figura 2), espaçados de 3,0 em 3,0 m, com braços voltados para a direção norte a fim de evitar que a sombra da haste de sustentação incida sobre o evaporatório.

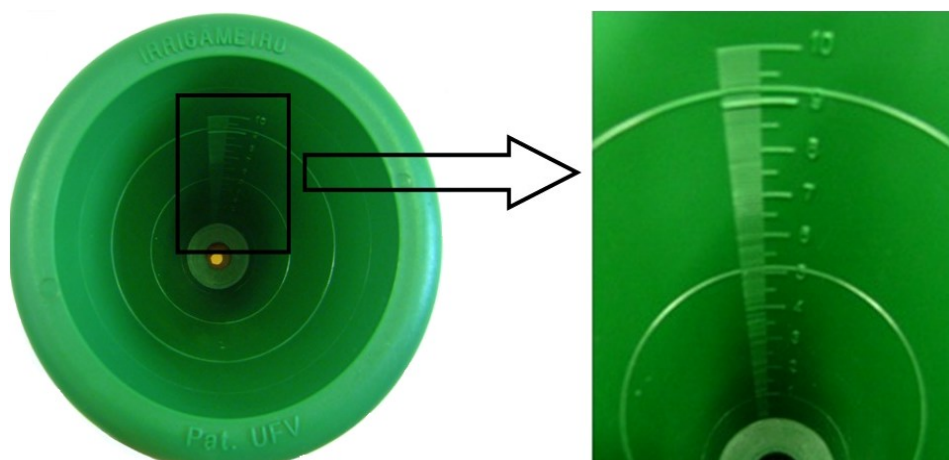
Figura 2. Vista dos Irrigâmetros instalados na área experimental.



Fonte: O autor (2010).

O experimento foi montado num delineamento inteiramente casualizado, com seis alturas da água no evaporatório, representando os tratamentos, com três repetições. Foram utilizadas como tratamentos as seguintes alturas da água: 2, 3, 4, 5, 6 e 7 cm, tomados a partir de um nível de referência, numa escala ascendente, existente no interior do evaporatório do aparelho (Figura 3).

Figura 3. Vista superior mostrando o formato cônico do evaporatório e detalhe da escala no seu interior, usada para ajuste do nível de água.



Fonte: Elaborada pelo autor (2010).

A estação meteorológica automática instalada na área experimental é da marca DAVIS modelo Vantage Pro II, a qual enviava os dados climáticos via rádio para um console que era acessado diariamente. Utilizou-se dados horários de radiação solar global, umidade relativa média do ar, velocidade do vento média e temperatura máxima e mínima do ar.

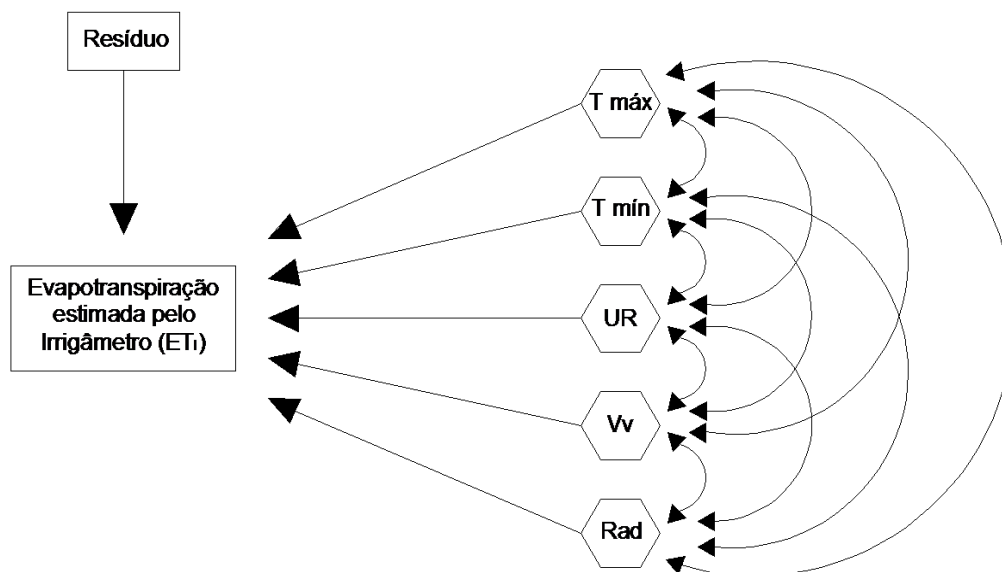
Os dias chuvosos foram excluídos para manter a integridade dos dados, haja vista que a chuva altera a altura da água no evaporatório do aparelho e a restituição da altura original nem sempre ocorre logo após o término da precipitação.

O período de coleta de dados teve início em setembro de 2008 e foi finalizado em setembro de 2011, resultando em três anos de coleta. As leituras nos Irrigômetros foram realizadas diariamente às 9 horas, na escala graduada em décimos de milímetro existente no tubo de alimentação do aparelho. O valor diário da estimativa da evapotranspiração foi obtido pela diferença entre duas leituras diárias consecutivas.

A análise de trilha foi realizada com o objetivo de estimar as correlações e analisar a relação entre as variáveis explicativas - temperatura máxima e mínima, umidade relativa, velocidade do vento e radiação solar global - pelos seus desdobramentos em efeitos diretos e indiretos sobre a variável principal, representada pela evapotranspiração estimada pelos Irrigômetros operando nos tratamentos A2, A3, A4, A5, A6 e A7, correspondentes às alturas da água no evaporatório do Irrigômetro de 2, 3, 4, 5, 6 e 7 cm, respectivamente.

Na Figura 4 tem-se o diagrama utilizado na interpretação dos resultados da análise de trilha, que desdobra os coeficientes de Pearson em efeitos diretos e indiretos. As setas unidirecionais indicam o efeito direto de uma variável explicativa sobre a variável principal, enquanto que os arcos bidirecionais representam a interdependência de duas variáveis explicativas e determinam a trilha representativa do efeito indireto sobre a variável básica.

Figura 4. Diagrama causal indicando o inter-relacionamento das variáveis explicativas: T_{máx} = temperatura máxima; T_{mín} = temperatura mínima; UR = umidade relativa; Vv = velocidade do vento e Rad = radiação solar global, sobre a variável principal ET_i.



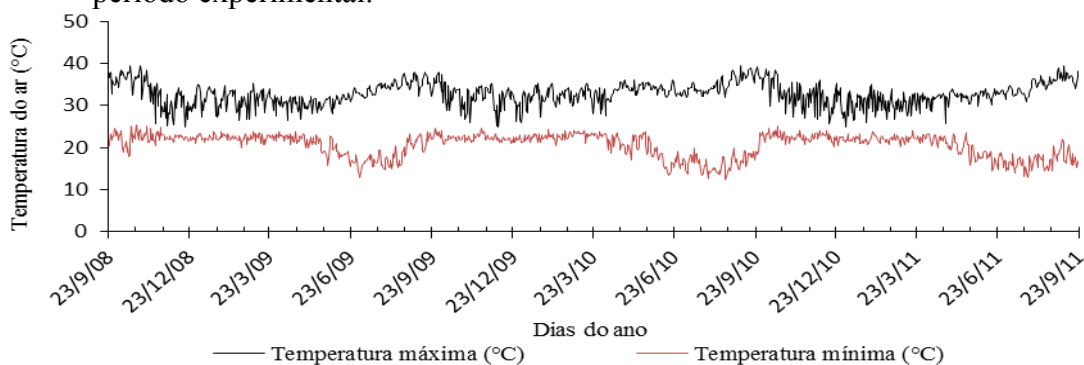
Fonte: Elaborada pelo autor (2010).

A fim de eliminar possíveis erros de interpretação dos resultados da análise de trilha, primeiramente foi realizada a avaliação da multicolinearidade de acordo com a metodologia sugerida por Cruz e Regazzi (1997). Tal avaliação foi realizada a partir das matrizes dos coeficientes de correlação de cada estação do ano. Posteriormente, as variáveis explicativas foram previamente escolhidas e fez-se, inicialmente, a análise de correlação linear simples (correlação de Pearson), utilizando-se o programa estatístico SAEG (RIBEIRO JÚNIOR, 2001), para a obtenção das matrizes de correlação e suas significâncias pelo teste “t” em níveis de 1% e 5% de probabilidade.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

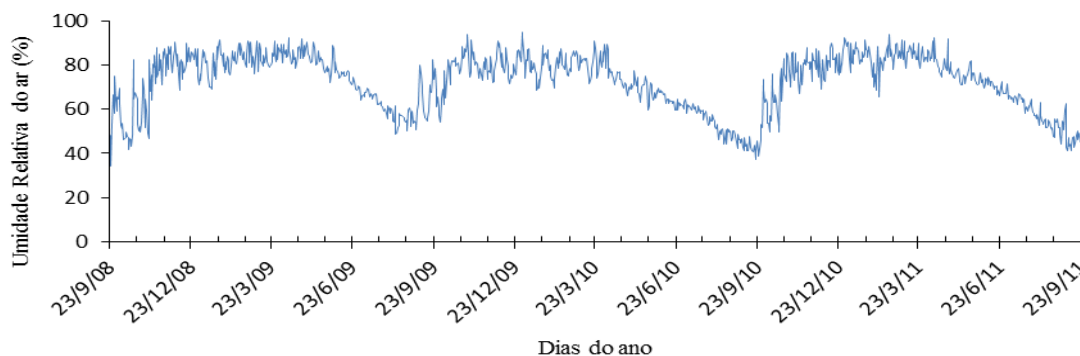
Nas Figuras 5, 6, 7 e 8, estão apresentadas as variações dos valores dos elementos meteorológicos durante o período experimental, composto por 1095 observações.

Figura 5. Variação diária dos valores de temperatura máxima e mínima do ar durante o período experimental.



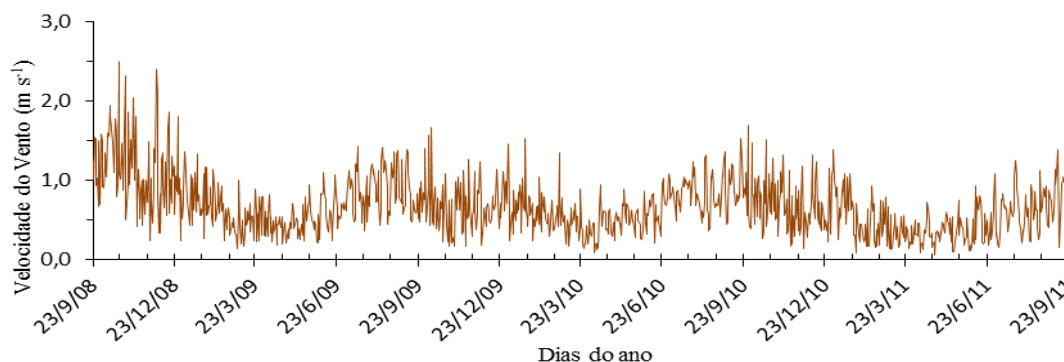
Na Figura 5 observa-se que durante o período experimental os valores médios da temperatura máxima e mínima do ar foram 32,8°C e 20,5°C respectivamente. A temperatura máxima no período foi 39,5°C (17/10/2008) e a mínima 12,3°C (20/08/2010).

Figura 6. Variação diária da umidade relativa média do ar durante o período experimental.



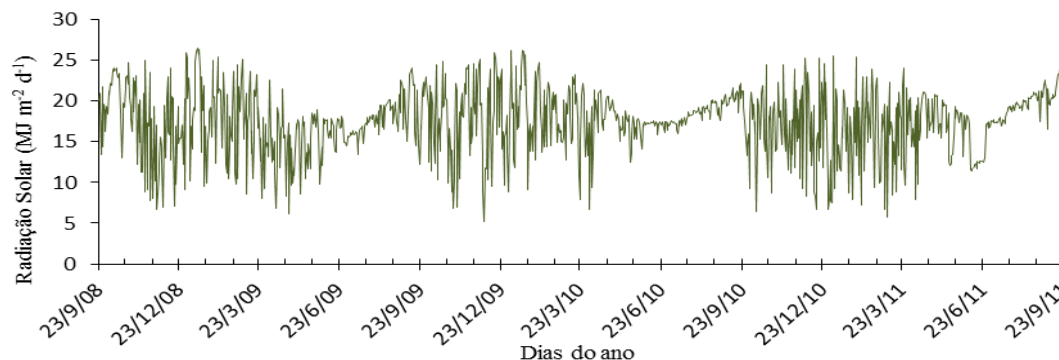
Na região sul do estado do Tocantins, as estações chuvosa (novembro até maio) e seca (junho até outubro) são bem distintas. Na figura anterior pode-se observar que a umidade relativa média do ar na estação chuvosa foi elevada, com valores médios de 81,8; 78,3 e 81,4% para o primeiro, segundo e terceiro ano, respectivamente. Na estação seca os valores médios foram de 67,9; 57,4 e 59,7%, respectivamente.

Figura 7. Variação diária da velocidade média do vento durante o período experimental.



Na figura acima verifica-se que a velocidade do vento média é maior entre julho e setembro. A velocidade média do vento durante o período experimental foi de 0,66 m s⁻¹.

Figura 8. Variação diária da radiação solar global durante o período experimental.



Na Figura 8 verifica-se que a radiação solar global apresentou menor variação diária entre maio e agosto e maior variação no período entre setembro e abril, em virtude de maior nebulosidade presente na atmosfera em alguns dias desse período, interferindo assim na chegada dos raios solares até o radiômetro da estação. O valor médio diário durante o período experimental foi de $17,52 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. A máxima e a mínima radiação solar global para o período foi de $26,53$ (13/01/2009) e $5,24$ (04/12/2009) $\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, respectivamente.

Medeiros (2002) menciona que os principais elementos meteorológicos que proporcionam energia para evaporação e remoção de vapor de água, a partir de superfícies evaporantes, são a radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento, sendo a radiação solar o elemento de maior influência na demanda evaporativa da atmosfera.

Nas Tabelas 1 a 4 estão apresentados os resultados da análise de trilha com estimativa dos efeitos diretos e indiretos, e a correlação total entre a evapotranspiração obtida no Irrigâmetro (ET_I) e as variáveis temperatura máxima, temperatura mínima, umidade relativa, velocidade do vento e radiação solar global para as quatro estações do ano.

Analisando a Tabela 1 observa-se que o elemento que apresenta maior correlação com a ET_I é a umidade relativa, sendo negativa e significativa ao nível de 1% de probabilidade pelo teste “t”. Na primavera, apenas a correlação entre a temperatura mínima e a ET_I para o tratamento A7 não foi significativa. Examinando os efeitos indiretos, a temperatura máxima, via umidade relativa apresentou as maiores correlações com a ET_I .

Para o verão (Tabela 2), os elementos de maior relação mútua com a ET_I foram umidade relativa e radiação solar global, sendo as correlações significativas ao nível de 1% de probabilidade para todos os tratamentos. A correlação entre a variável temperatura mínima e ET_I foi não significativa para todos os tratamentos. Este mesmo resultado foi obtido para velocidade do vento, à exceção da altura A6.

Avaliando o efeito direto dos elementos meteorológicos sobre a evapotranspiração estimada pelo Irrigâmetro no outono (Tabela 3), observa-se maior correlação da umidade relativa com a ET_I , sendo essa correlação negativa. Nesta estação, todas as correlações dos elementos estudados com a ET_I foram significativas ao nível de 1% de probabilidade pelo teste “t”, exceto a correlação da velocidade do vento com a ET_I para o tratamento A1, que foi significativa ao nível de 5% de probabilidade. A temperatura máxima via umidade relativa, apresentou as maiores correlações quando analisados os efeitos indiretos das variáveis sobre a ET_I para todos os tratamentos.

No inverno (Tabela 4), a umidade relativa do ar apresentou maior correlação com a ET_I , quando comparados os efeitos diretos. As correlações dos elementos temperatura máxima, umidade relativa do ar e radiação solar com a ET_I foram significativas ao nível de 1% de probabilidade pelo teste “t”. Já a correlação entre a velocidade do vento e a ET_I para o tratamento A2 foi não significativa.

Tabela 1. Estimativa dos efeitos diretos e indiretos, e a correlação total entre a evapotranspiração obtida no Irrigâmetro ($ET_I - \text{mm.dia}^{-1}$) e as variáveis temperatura máxima ($T_{\text{max}} - ^\circ\text{C}$), temperatura mínima ($T_{\text{min}} - ^\circ\text{C}$), umidade relativa (UR - %), velocidade do vento ($V_v - \text{m.s}^{-1}$) e radiação solar global ($R_s - \text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$) para a estação de primavera.

	Alturas de água no evaporatório do Irrigâmetro					
Tmax	A2	A3	A4	A5	A6	A7
Direto sobre ET_I	0,0388	0,0996	0,2315	0,1946	0,2282	0,1330
Indireto via $T_{\text{mín}}$	0,0090	0,0064	0,0102	0,0056	0,0055	-0,0003
Indireto via UR	0,4614	0,5812	0,4720	0,4401	0,4278	0,5013
Indireto via V_v	0,0280	0,0095	0,0143	0,0367	0,0552	0,0608
Indireto via R_s	0,1120	0,0439	0,0401	0,0569	0,0344	0,0459
Total (correlação Pearson)	0,6492**	0,7407**	0,7681**	0,7339**	0,7511**	0,7407**
Tmin						
Direto sobre ET_I	-0,1500	-0,1080	-0,1701	-0,0934	-0,0927	0,0049
Indireto via T_{max}	-0,0023	-0,0059	-0,0138	-0,0116	-0,0136	-0,0079
Indireto via UR	-0,1092	-0,1375	-0,1117	-0,1041	-0,1012	-0,1186
Indireto via V_v	-0,0165	-0,0056	-0,0084	-0,0216	-0,0325	-0,0358
Indireto via R_s	-0,0058	-0,0023	-0,0021	-0,0030	-0,0018	-0,0024
Total (correlação Pearson)	-0,2838**	-0,2594**	-0,3061**	-0,2337*	-0,2419*	-0,1599ns
UR						
Direto sobre ET_I	-0,5337	-0,6720	-0,5460	-0,5091	-0,4948	-0,5799
Indireto via T_{max}	-0,0336	-0,0861	-0,2001	-0,1682	-0,1973	-0,1150
Indireto via $T_{\text{mín}}$	-0,0307	-0,0221	-0,0348	-0,0191	-0,0190	0,0010
Indireto via V_v	-0,0374	-0,0127	-0,0191	-0,0490	-0,0738	-0,0812
Indireto via R_s	-0,0905	-0,0355	-0,0324	-0,0460	-0,0278	-0,0371
Total (correlação Pearson)	-0,7259**	-0,8287**	-0,8324**	-0,7914**	-0,8126**	-0,8122**
Vv						
Direto sobre ET_I	0,0748	0,0255	0,0382	0,0980	0,1476	0,1625
Indireto via T_{max}	0,0145	0,0373	0,0866	0,0728	0,0854	0,0497
Indireto via $T_{\text{mín}}$	0,0331	0,0238	0,0375	0,0206	0,0204	-0,0011
Indireto via UR	0,2668	0,3361	0,2729	0,2545	0,2474	0,2899
Indireto via R_s	0,0260	0,0102	0,0093	0,0132	0,0080	0,0107
Total (correlação Pearson)	0,4152**	0,4328**	0,4445**	0,4591**	0,5087**	0,5117**
Rs						
Direto sobre ET_I	0,1475	0,0578	0,0529	0,0750	0,0453	0,0605
Indireto via T_{max}	0,0295	0,0756	0,1757	0,1477	0,1732	0,1009
Indireto via T_{min}	0,0060	0,0043	0,0067	0,0037	0,0037	-0,0002
Indireto via UR	0,3274	0,4123	0,3349	0,3122	0,3035	0,3556
Indireto via V_v	0,0132	0,0045	0,0067	0,0173	0,0260	0,0286
Total (correlação Pearson)	0,5235**	0,5545**	0,5769**	0,5559**	0,5517**	0,5455**

ns não significativo a 5% pelo teste t; * significativo a 5% pelo teste t; ** significativo a 1% pelo teste t.

Tabela 2. Estimativa dos efeitos diretos e indiretos, e a correlação total entre a evapotranspiração obtida no Irrigâmetro ($ET_I - \text{mm.dia}^{-1}$) e as variáveis temperatura máxima ($T_{\text{max}} - ^\circ\text{C}$), temperatura mínima ($T_{\text{min}} - ^\circ\text{C}$), umidade relativa ($UR - \%$), velocidade do vento ($V_v - \text{m.s}^{-1}$) e radiação solar global ($R_s - \text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$) para a estação de verão.

	Alturas de água no evaporatório do Irrigâmetro					
Tmax	A2	A3	A4	A5	A6	A7
Direto sobre ET_I	-0,0934	-0,0447	0,1720	0,0322	0,1939	0,1393
Indireto via T_{min}	0,0136	-0,0057	-0,0033	0,0097	0,0008	0,0008
Indireto via UR	0,0923	0,1559	0,0998	0,1497	0,0072	0,0138
Indireto via V_v	-0,0014	-0,0024	-0,0022	-0,0027	-0,0065	-0,0035
Indireto via R_s	0,1866	0,0899	0,0639	0,1374	0,1510	0,1409
Total (correlação Pearson)	0,1977ns	0,1931ns	0,3302**	0,3263**	0,3465**	0,2912**
Tmin						
Direto sobre ET_I	0,0908	-0,0383	-0,0219	0,0649	0,0054	0,0052
Indireto via T_{max}	-0,0140	-0,0067	0,0257	0,0048	0,0290	0,0208
Indireto via UR	0,0112	0,0190	0,0121	0,0182	0,0009	0,0017
Indireto via V_v	-0,0016	-0,0027	-0,0026	-0,0031	-0,0075	-0,0041
Indireto via R_s	-0,0061	-0,0029	-0,0021	-0,0045	-0,0050	-0,0046
Total (correlação Pearson)	0,0805ns	-0,0317ns	0,0112ns	0,0803ns	0,0228ns	0,0190ns
UR						
Direto sobre ET_I	-0,1298	-0,2194	-0,1404	-0,2106	-0,0101	-0,0194
Indireto via T_{max}	0,0664	0,0317	-0,1223	-0,0229	-0,1378	-0,0990
Indireto via T_{min}	-0,0079	0,0033	0,0019	-0,0056	-0,0005	-0,0005
Indireto via V_v	-0,0054	-0,0094	-0,0089	-0,0108	-0,0258	-0,0140
Indireto via R_s	-0,1851	-0,0892	-0,0634	-0,1363	-0,1498	-0,1397
Total (correlação Pearson)	-0,2618**	-0,2829**	-0,3331**	-0,3862**	-0,3240**	-0,2726**
Vv						
Direto sobre ET_I	0,0476	0,0833	0,0791	0,0958	0,2288	0,1245
Indireto via T_{max}	0,0027	0,0013	-0,0049	-0,0009	-0,0055	-0,0040
Indireto via T_{min}	-0,0030	0,0013	0,0007	-0,0021	-0,0002	-0,0002
Indireto via UR	0,0146	0,0247	0,0158	0,0237	0,0011	0,0022
Indireto via R_s	0,0279	0,0134	0,0095	0,0205	0,0226	0,0210
Total (correlação Pearson)	0,0897ns	0,1240ns	0,1004ns	0,1370ns	0,2468*	0,1436ns
Rs						
Direto sobre ET_I	0,2453	0,1183	0,0840	0,1807	0,1985	0,1852
Indireto via T_{max}	-0,0711	-0,0340	0,1309	0,0245	0,1475	0,1060
Indireto via T_{min}	-0,0023	0,0010	0,0005	-0,0016	-0,0001	-0,0001
Indireto via UR	0,0980	0,1655	0,1059	0,1589	0,0076	0,0146
Indireto via V_v	0,0054	0,0095	0,0090	0,0109	0,0260	0,0141
Total (correlação Pearson)	0,2754**	0,2602*	0,3303**	0,3733**	0,3796**	0,3198**

ns não significativo a 5% pelo teste t; * significativo a 5% pelo teste t; ** significativo a 1% pelo teste t.

Tabela 3. Estimativa dos efeitos diretos e indiretos, e a correlação total entre a evapotranspiração obtida no Irrigâmetro ($ET_I - \text{mm.dia}^{-1}$) e as variáveis temperatura máxima ($T_{\text{max}} - ^\circ\text{C}$), temperatura mínima ($T_{\text{min}} - ^\circ\text{C}$), umidade relativa ($UR - \%$), velocidade do vento ($V_v - \text{m.s}^{-1}$) e radiação solar global ($R_s - \text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$) para a estação de outono.

Tmax	Alturas de água no evaporatório do Irrigâmetro					
	A2	A3	A4	A5	A6	A7
Direto sobre ET_I	-0,0622	-0,0150	-0,1649	-0,1015	0,0564	0,0851
Indireto via T_{min}	-0,0084	-0,0071	-0,0039	-0,0092	-0,0014	0,0006
Indireto via UR	0,5459	0,5703	0,6977	0,6965	0,6148	0,5376
Indireto via V_v	-0,0007	0,0011	-0,0004	-0,0018	-0,0002	0,0023
Indireto via R_s	0,0514	0,0627	0,0600	0,0727	0,0282	0,0485
Total (correlação Pearson)	0,5260**	0,6120**	0,5885**	0,6568**	0,6978**	0,6740**
Tmin						
Direto sobre ET_I	0,0601	0,0509	0,0278	0,0657	0,0099	-0,0045
Indireto via T_{max}	0,0087	0,0021	0,0230	0,0142	-0,0079	-0,0119
Indireto via UR	-0,4164	-0,4350	-0,5322	-0,5313	-0,4689	-0,4100
Indireto via V_v	0,0013	-0,0021	0,0007	0,0033	0,0004	-0,0042
Indireto via R_s	-0,0046	-0,0056	-0,0054	-0,0065	-0,0025	-0,0044
Total (correlação Pearson)	-0,3510**	-0,3897**	-0,4861**	-0,4546**	-0,4691**	-0,4350**
UR						
Direto sobre ET_I	-0,7063	-0,7379	-0,9027	-0,9012	-0,7954	-0,6955
Indireto via T_{max}	0,0481	0,0116	0,1274	0,0784	-0,0436	-0,0657
Indireto via T_{min}	0,0354	0,0300	0,0164	0,0387	0,0058	-0,0027
Indireto via V_v	0,0022	-0,0035	0,0012	0,0055	0,0006	-0,0070
Indireto via R_s	-0,0368	-0,0448	-0,0429	-0,0520	-0,0202	-0,0347
Total (correlação Pearson)	-0,6574**	-0,7446**	-0,8006**	-0,8305**	-0,8527**	-0,8056**
Vv						
Direto sobre ET_I	-0,0083	0,0133	-0,0046	-0,0210	-0,0024	0,0267
Indireto via T_{max}	-0,0052	-0,0013	-0,0139	-0,0086	0,0048	0,0072
Indireto via T_{min}	-0,0094	-0,0080	-0,0044	-0,0103	-0,0016	0,0007
Indireto via UR	0,1846	0,1929	0,2360	0,2356	0,2079	0,1818
Indireto via R_s	0,0192	0,0234	0,0224	0,0272	0,0105	0,0181
Total (correlação Pearson)	0,1809*	0,2203**	0,2355**	0,2229**	0,2193**	0,2346**
Rs						
Direto sobre ET_I	0,0957	0,1167	0,1116	0,1353	0,0524	0,0903
Indireto via T_{max}	-0,0335	-0,0081	-0,0887	-0,0546	0,0303	0,0457
Indireto via T_{min}	-0,0029	-0,0025	-0,0013	-0,0032	-0,0005	0,0002
Indireto via UR	0,2714	0,2835	0,3469	0,3463	0,3056	0,2673
Indireto via V_v	-0,0017	0,0027	-0,0009	-0,0042	-0,0005	0,0054
Total (correlação Pearson)	0,3290**	0,3923**	0,3676**	0,4196**	0,3875**	0,4089**

ns não significativo a 5% pelo teste t; * significativo a 5% pelo teste t; ** significativo a 1% pelo teste t.

Tabela 4. Estimativa dos efeitos diretos e indiretos, e a correlação total entre a evapotranspiração obtida no Irrigâmetro ($ET_I - \text{mm.dia}^{-1}$) e as variáveis temperatura máxima ($T_{\text{max}} - ^\circ\text{C}$), temperatura mínima ($T_{\text{min}} - ^\circ\text{C}$), umidade relativa ($UR - \%$), velocidade do vento ($V_v - \text{m.s}^{-1}$) e radiação solar global ($R_s - \text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$) para a estação de inverno.

Tmax	Alturas de água no evaporatório do Irrigâmetro					
	A2	A3	A4	A5	A6	A7
Direto sobre ET_I	0,2328	0,1833	0,0820	0,0147	0,1227	0,1875
Indireto via T_{min}	0,0002	-0,0040	-0,0011	0,0061	0,0178	0,0055
Indireto via UR	0,2910	0,3499	0,3832	0,4660	0,4005	0,3742
Indireto via V_v	-0,0272	-0,0392	-0,0245	-0,0235	-0,0386	-0,0483
Indireto via R_s	0,0344	0,0191	0,0484	0,0369	0,0370	0,0282
Total (correlação Pearson)	0,5312**	0,5091**	0,4882**	0,5002**	0,5395**	0,5478**
Tmin						
Direto sobre ET_I	0,0006	-0,0097	-0,0022	0,0148	0,0433	0,0134
Indireto via T_{max}	0,0959	0,0755	0,0337	0,0060	0,0505	0,0772
Indireto via UR	0,0461	0,0554	0,0607	0,0738	0,0634	0,0592
Indireto via V_v	0,0105	0,0151	0,0094	0,0090	0,0148	0,0185
Indireto via R_s	-0,0143	-0,0079	-0,0201	-0,0153	-0,0154	-0,0120
Total (correlação Pearson)	0,1387*	0,1283ns	0,0815ns	0,0883ns	0,1567*	0,1564*
UR						
Direto sobre ET_I	-0,4233	-0,5090	-0,5575	-0,6780	-0,5827	-0,5444
Indireto via T_{max}	-0,1600	-0,1260	-0,0564	-0,0101	-0,0843	-0,1288
Indireto via T_{min}	-0,0001	0,0011	0,0002	-0,0016	-0,0047	-0,0015
Indireto via V_v	-0,0144	-0,0207	-0,0130	-0,0124	-0,0204	-0,0255
Indireto via R_s	-0,0602	-0,0334	-0,0847	-0,0646	-0,0647	-0,0506
Total (correlação Pearson)	-0,6580**	-0,6880**	-0,7113**	-0,7666**	-0,7569**	-0,7508**
Vv						
Direto sobre ET_I	0,1150	0,1656	0,1038	0,0992	0,1631	0,2040
Indireto via T_{max}	-0,0551	-0,0434	-0,0194	-0,0035	-0,0290	-0,0444
Indireto via T_{min}	0,0001	-0,0009	-0,0002	0,0013	0,0039	0,0012
Indireto via UR	0,0529	0,0637	0,0697	0,0848	0,0729	0,0681
Indireto via R_s	0,0111	0,0062	0,0157	0,0120	0,0120	0,0094
Total (correlação Pearson)	0,1241ns	0,1912**	0,1696*	0,1938**	0,2228**	0,2383**
Rs						
Direto sobre ET_I	0,1175	0,0652	0,1654	0,1261	0,1263	0,0987
Indireto via T_{max}	0,0682	0,0537	0,0240	0,0043	0,0359	0,0549
Indireto via T_{min}	-0,0001	0,0012	0,0003	-0,0018	-0,0053	-0,0016
Indireto via UR	0,2168	0,2607	0,2855	0,3472	0,2985	0,2788
Indireto via V_v	0,0101	0,0157	0,0098	0,0094	0,0155	0,0193
Total (correlação Pearson)	0,4133**	0,3965**	0,4851**	0,4852**	0,4709**	0,4502**

ns não significativo a 5% pelo teste t; * significativo a 5% pelo teste t; ** significativo a 1% pelo teste t.

Quando é realizada a análise da correlação dos efeitos indiretos dos elementos meteorológicos sobre a ET_1 nas quatro estações do ano, observa-se que há uma tendência de haver maior correlação da temperatura máxima com a umidade relativa do ar. As menores correlações ocorrem, na maioria das vezes, quando um elemento meteorológico é relacionado com a temperatura mínima e com a velocidade do vento, não apresentando relação de causa e efeito com a ET_1 .

Percebe-se que, na maioria das vezes, à medida que se eleva a altura da água dentro do evaporatório, a correlação da velocidade do vento com a evapotranspiração do Irrigâmetro aumenta devido à proximidade da lâmina da água com a borda do evaporatório, facilitando a remoção do ar úmido. Por outro lado, quanto menor a altura da água no evaporatório, menor é a massa de água no seu interior. Logo, para aquecer ou evaporar a água nas alturas menores, é necessária menor quantidade de energia proveniente da radiação solar global. Assim, este elemento meteorológico é mais importante na estimativa da evapotranspiração pelo Irrigâmetro quando a altura de água no evaporatório é menor, apresentando alta correlação com a ET_1 .

Em estudo realizado na região de Viçosa, MG, Caixeta (2009) observou que o efeito indireto do elemento meteorológico temperatura máxima, via radiação solar global, destacou-se como o mais associado à evapotranspiração, em todas as alturas da água dentro do evaporatório do Irrigâmetro. Ainda segundo esse autor, tal efeito foi elevado tanto quanto o efeito direto da temperatura máxima.

Na análise da correlação total entre a ET_1 e os demais elementos meteorológicos, observou-se que a temperatura máxima apresentou correlação positiva e significativa ao nível de 1% de probabilidade pelo teste “t” com a ET_1 , na maioria dos tratamentos e em todas as estações. As exceções foram para os tratamentos A2 e A3 no verão.

A correlação da temperatura mínima com a ET_1 foi negativa e significativa a 1% de probabilidade pelo teste “t” para a estação do outono, sendo não significativa no verão; no inverno, essa correlação foi positiva para todos os tratamentos, mas significativa apenas para as alturas A2, A6 e A7. Durante a primavera, as correlações foram negativas e apenas no tratamento A7 a correlação foi não significativa.

A umidade relativa do ar apresentou correlação negativa e significativa a 1% de probabilidade pelo teste “t” com a ET_1 em todas as estações do ano. Observa-se menor influência da umidade relativa na evapotranspiração estimada pelo Irrigâmetro para a estação de verão, quando os valores desse elemento meteorológico são mais elevados (Figura 5).

A correlação da velocidade do vento com a ET_1 foi positiva para todos os tratamentos em todas as estações do ano, sendo, em geral, não significativa durante o verão (Figura 6).

A radiação solar global é o elemento que apresentou correlação positiva e significativa a 1% de probabilidade pelo teste “t” com a ET_1 , em todas as estações do ano. Observa-se maior influência da radiação na evapotranspiração estimada pelo Irrigâmetro na estação da primavera e menor influência no verão.

Amorim (1998), estudando as ligações da evapotranspiração com os elementos meteorológicos no município de Governador Dix-Sept Rosado, RN, observou que a insolação foi o elemento meteorológico de maior influência no processo de evapotranspiração, enquanto que a temperatura média compensada foi o elemento que apresentou menor influência.

Caixeta (2009) observou, em estudo realizado entre março e setembro de 2008 na região de Viçosa, MG, que a temperatura mínima foi o elemento que apresentou a menor correlação com a evapotranspiração do Irrigâmetro, enquanto a velocidade do vento mostrou correlação não significativa.

Insolação e velocidade do vento foram os elementos com maior representatividade no processo da evapotranspiração para as condições climáticas da região Centro-Sul do Estado do Ceará, de acordo com Andrade et al. (2003). Os mesmos autores relatam que as temperaturas máxima e mínima apresentaram a menor influência no processo.

Na Tabela 5 estão apresentados os valores dos coeficientes de correlação de Pearson entre as variáveis explicativas para a evapotranspiração estimada pelo Irrigâmetro, nas estações do ano.

Analisando a Tabela 5, observa-se que, durante todas as estações do ano, a correlação entre o elemento meteorológico temperatura máxima e os elementos umidade relativa do ar e radiação solar global foi alta e significativa a 1% de probabilidade pelo teste “t”. Contudo, a correlação foi positiva com a radiação e negativa com a umidade relativa, ou seja, a temperatura máxima foi maior em dias com radiação solar global maior e menor em dias com maior umidade relativa. Na estação da primavera, observa-se que a correlação da umidade relativa com a temperatura mínima foi significativa ao nível de 5% de probabilidade pelo teste “t” e significativa ao nível de 1% com os demais elementos.

Tabela 5. Estimativa dos coeficientes de correlação de Pearson entre as variáveis explicativas para a evapotranspiração estimada pelo Irrigâmetro, para as quatro estações do ano.

	Temperatura mínima do ar (°C)	Umidade relativa média do ar (%)	Velocidade do vento média (m.s ⁻¹)	Radiação Solar Global (MJ m ⁻² d ⁻¹)
Primavera				
Tmax (°C)	-0,0597ns	-0,8645**	0,3744**	0,7590**
Tmin (°C)		0,2045*	-0,2200*	-0,0396ns
UR (%)			-0,5004**	-0,6133**
Vv (m.s ⁻¹)				0,1763ns
Verão				
Tmax (°C)	0,1494ns	-0,7107**	-0,0280ns	0,7606**
Tmin (°C)		-0,0865ns	-0,0332ns	-0,0250ns
UR (%)			-0,1125ns	-0,7545**
Vv (m.s ⁻¹)				0,1146ns
Outono				
Tmax (°C)	-0,1395ns	-0,7728**	0,0851ns	0,5377**
Tmin (°C)		0,5895**	-0,1573*	-0,0482ns
UR (%)			-0,2617**	-0,3842**
Vv (m.s ⁻¹)				0,2011**
Inverno				
Tmax (°C)	0,4117**	-0,6873**	-0,2377**	0,2929**
Tmin (°C)		-0,1088ns	0,0906ns	-0,1216ns
UR (%)			-0,1243ns	-0,5123**
Vv (m.s ⁻¹)				0,0942ns

ns não significativo a 5% pelo teste t; * significativo a 5% pelo teste t; ** significativo a 1% pelo teste t

Durante a estação do verão, os elementos meteorológicos velocidade do vento e temperatura mínima mostraram correlação não significativa com todos os outros elementos estudados. Analisando a estação do outono, nota-se que a correlação do elemento velocidade

do vento com os demais elementos foi não significativa apenas para a temperatura máxima. Ocorreu correlação significativa entre a umidade relativa e todos os elementos estudados.

No inverno, a correlação entre a temperatura máxima e os demais elementos meteorológicos é significativa a 1% de probabilidade pelo teste “t”. Correlações não significativas foram obtidas para temperatura mínima e velocidade do vento com os demais elementos, exceto com a temperatura máxima.

6 CONCLUSÕES

De acordo com o estudo realizado, concluiu-se que os elementos meteorológicos umidade relativa média do ar e a radiação solar global apresentaram alta correlação com a evapotranspiração estimada pelo Irrigâmetro em todas as estações do ano. Os elementos temperatura mínima e a velocidade do vento apresentaram menor efeito indireto sobre a evapotranspiração estimada pelo Irrigâmetro, quando associadas aos demais elementos meteorológicos.

7 REFERÊNCIAS

- AMORIM, M.C. **Avaliação da eficácia do lisímetro de lençol freático constante, do tanque classe “A” e do modelo de Penman-Monteith (FAO) para estimativa da evapotranspiração de referência (ET₀)**.1998. 56 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- ANDRADE, E.M.; SILVEIRA, S.S.; AZEVEDO, B.M. Investigação da estrutura multivariada da evapotranspiração na região do centro sul do Ceará pela análise de componentes principais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, RS, v. 8, n. 1, p. 39-44, 2003.
- CAIXETA, S.P. **Efeitos de elementos meteorológicos na evapotranspiração estimada pelo Irrigâmetro nas condições climáticas da zona da mata mineira**. 2009. 51 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.
- CRUZ, C.D.; CARNEIRO, P.C.S. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. Viçosa, MG: UFV, 2003. v. 2, 585 p.
- CRUZ, C.D.; REGAZZI, A.J. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**.2.ed. Viçosa, MG: UFV, 1997. 390 p.
- DOORENBOS, J.; PRUITT, J.O. **Crop water requeriment**. Rome: FAO, 1977. 144 p. (FAO Irrigation and Drainage Paper, 24).
- FURTADO, M.R.; CRUZ, C.D.; CARDOSO, A.A.; COELHO, A.D.F.; PETERNELLI, L. A. Análise de trilha do rendimento do feijoeiro e seus componentes primários em monocultivo e em consórcio com a cultura do milho. **Ciência Rural**, Santa Maria, RS, v. 32, p. 217-220, 2002.

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.** 2002. 103 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP.

MONTES, D.R.P. **Evapotranspiração da cultura da alface dentro e fora de ambiente protegido.** 2008. 83 f. Tese (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa-UFV, Viçosa, MG.

OLIVEIRA, R.A.; RAMOS, M.M. **Manual do Irrigâmetro.** Viçosa, MG: UFV, 2008. 144p.

OLIVEIRA, R.A.; TAGLIAFERRE, C.; SEDIYAMA, G.C.; MATERAM, F.J.V.; CECON, P.R. Desempenho do Irrigâmetro na estimativa da evapotranspiração de referência. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v. 12, n. 2, p. 166-173, 2008.

OLIVEIRA, E.M.; OLIVEIRA, R.A.; SEDIYAMA, G.C.; CECON, P.R.; DRUMOND, L.C.D. Análise do coeficiente e o desempenho do Irrigâmetro e a influência dos elementos do clima na estimativa da evapotranspiração. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, MG, v. 19, n. 4, p. 348-360, 2011.

RIBEIRO JÚNIOR, J.I. **Análises estatísticas no SAEG.** Viçosa, MG: UFV, 2001. 301 p.

ROCHA, O.C.; GUERRA, A.F.; AZEVEDO, H.M. Ajuste do modelo Chistiansen-Hargreaves para estimativa da evapotranspiração do feijão no cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, v. 7, n. 2, p. 263-268, 2003.

TAGLIAFERRE, C.; SANTOS, L.C.; NETO, I.J.S.; SANTOS, T.J.; ROCHA, F.A.; GUIMARÃES, D.U. Estimativa da evapotranspiração de referência com uso do Irrigâmetro em Vitória da Conquista-BA. **Irriga**, Botucatu, SP, v. 17, n. 1, p. 28-38, 2012.