

EDNALDO MIRANDA DE OLIVEIRA

**DESEMPENHO DO IRRIGÂMETRO NA ESTIMATIVA DA  
EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA NA REGIÃO DO ALTO  
PARANAÍBA-MG**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

VIÇOSA  
MINAS GERAIS - BRASIL  
2009

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e  
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

O48d  
2009

Oliveira, Ednaldo Miranda de, 1983-

Desempenho do irrigâmetro na estimativa da evapotrans-  
piração de referência na região do Alto Paranaíba - MG /  
Ednaldo Miranda de Oliveira. – Viçosa, MG, 2009.  
xi, 63f. : il (algumas col.) ; 29cm.

Inclui apêndice.

Orientador: Rubens Alves de Oliveira.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 49-53.

1. Irrigação. 2. Água - Conservação. 3. Solo - Conservação.  
I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDD 22.ed. 631.587

EDNALDO MIRANDA DE OLIVEIRA

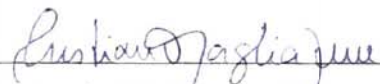
**DESEMPENHO DO IRRIGÂMETRO NA ESTIMATIVA DA  
EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA NA REGIÃO DO ALTO  
PARANAÍBA-MG**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 28 de julho de 2009



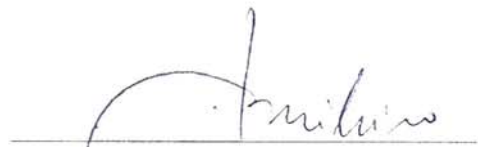
Prof. Luis César Dias Drumond  
(Coorientador)



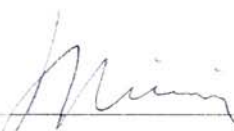
Prof. Cristiano Tagliaferre



Prof. Paulo José Hamakawa



Dr. Carlos Augusto Brasileiro de Alencar



Prof. Rubens Alves de Oliveira  
(Orientador)

Aos meus pais LEÔNCIO e IRACILDA ...

... à quem **DEDICO** e **OFEREÇO**, com muita satisfação, esta realização.

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pela presença constante em minha vida.

À minha família, pelo carinho, pela dedicação, pela confiança, pelos conselhos e pelo apoio infinito; aos meus irmãos Reginaldo, Leonardo e Leandro, pela torcida.

Ao meu avô Pedro e à minha avó Palmerinda, pelos ensinamentos, pelo incentivo, pela dedicação e pelo apoio incondicional.

Aos meus tios Genilton e Janeth, Edimilson e Eliane, pelo lar que me concederam e por me acolherem como filho; e aos meus primos Lucas e Gabriel, minhas primas Bárbara e Bruna, por me receberem como irmão.

A todos os meus primos, primas, tias e tios, por indiretamente, terem-me acompanhado e me apoiado nesta etapa da minha vida.

À Alexandra, minha namorada, pelo companheirismo, pela paciência e pelo carinho.

À Universidade Federal de Viçosa, por meio do Departamento de Engenharia Agrícola (DEA) e do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realização do Curso.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

Ao Professor Rubens Alves de Oliveira, pela oportunidade de realizar este trabalho e pela amizade, confiança e orientação.

Aos Professores conselheiros Gilberto C. Sedyama, Paulo Roberto Cecon e Luis César Dias Drumond, pela atenção e colaboração, pela assistência e pelos esclarecimentos durante o trabalho.

Ao Professor Cosme Damião, pela gentileza em ter cedido o programa computacional utilizado nas minhas análises estatísticas.

Aos meus amigos Roberto Milagres, Cristiano Tagliaferre, Fabrício Contin, Samuel Petraccone, Julio Baptestini e Caio Leite, pela grande amizade e pela contribuição profissional.

Aos estudantes de Iniciação Científica e meus grandes amigos Caio, Luan, Enoque e Aline, pelo companheirismo.

Aos estudantes de graduação orientados pelo Professor Luís César, pela colaboração nos trabalhos experimentais; Mayra, Jônata, Juliana, Carina, Júlio, Anita Cristina, Anita Fernanda e Rafael, pelo grande auxílio na condução do experimento, com seriedade, responsabilidade e dedicação.

Aos meus amigos de república Ítalo, Luis e Raphael, pelos momentos de descontração.

Aos amigos da República 1611 José Luís (“Zé Roia”), Félix (“Miau”), Moisés (“Moisa”), Everson (“Som-Zelito”), Hiunes (“Gordo”), Hamilton (“Rosa”), Marcos Felipe (“Japonês”), Lucas (“Virgensauro”), Cleverson (“Cabeça de Ovo”) e Reginaldo (“Rabisco”), pelo cafezinho.

A todos os meus amigos do Departamento de Engenharia Agrícola, por, de alguma forma, terem contribuído para a realização deste trabalho.

## **BIOGRAFIA**

EDNALDO MIRANDA DE OLIVEIRA, filho de Leôncio Bento de Oliveira e Iracilda Miranda de Oliveira, nasceu em Mantena, MG, em 3 de outubro de 1983.

Em março de 2003, ingressou no Curso de Engenharia Agrícola e Ambiental da Universidade Federal de Viçosa (UFV), em Viçosa, MG, concluindo-o em janeiro de 2008. Durante a graduação, foi bolsista de iniciação científica por dois anos consecutivos, pelo Programa PIBIC/CNPq.

Em março de 2008, ingressou no Programa de Pós-Graduação, em nível de Mestrado, em Engenharia Agrícola da UFRV, na área de concentração em Recursos Hídricos e Ambientais, submetendo-se à defesa da dissertação em julho de 2009.

## SUMÁRIO

RESUMO.....	viii
ABSTRACT.....	x
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>5</b>
2.1 ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO DE REFERÊNCIA .....	5
2.2 MANEJO DA IRRIGAÇÃO.....	9
2.3 IRRIGÂMETRO.....	10
2.4 ANÁLISE DE TRILHA .....	11
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS .....</b>	<b>15</b>
3.1 LOCAL E CARACTERIZAÇÃO DO EXPERIMENTO .....	15
3.2 ESTIMATIVA DA EVAPOTRANSPIRAÇÃO COM USO DO PROGRAMA COMPUTACIONAL REF-ET .....	19
3.3 COEFICIENTE DO IRRIGÂMETRO ( $K_f$ ) .....	19
3.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA E COEFICIENTE DE TRILHA.....	20



<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>24</b>
<b>5. CONCLUSÕES.....</b>	<b>47</b>
<b>6. REFERÊNCIAS.....</b>	<b>49</b>
<b>7. APÊNDICE A.....</b>	<b>54</b>

## RESUMO

OLIVEIRA, Ednaldo Miranda de, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2009. **Desempenho do Irrigâmetro na estimativa da evapotranspiração de referência na região do Alto Paranaíba-MG.** Orientador: Rubens Alves de Oliveira. Coorientadores: Gilberto Chohaku Sedyama, Paulo Roberto Cecon e Luis César Dias Drumond.

A quantificação do consumo de água pelas culturas agrícolas e o momento correto para sua aplicação são informações de grande valor no manejo da irrigação. Na Universidade Federal de Viçosa (UFV), em Viçosa, MG, foi desenvolvido um aparelho evapopluiométrico denominado Irrigâmetro, que possibilita medir a lâmina evapotranspirada e a precipitação pluvial, fornecendo diretamente o momento de irrigar e o tempo de funcionamento de um sistema de irrigação ou a sua velocidade de deslocamento. Nesta pesquisa, os objetivos foram: (a) determinar o coeficiente do Irrigâmetro ( $K_I$ ), mensalmente, nas alturas 1, 2, 3, 4, 5 e 6 cm do nível de água no evaporatório, em intervalos de um, três, cinco e sete dias; (b) avaliar o desempenho do Irrigâmetro para estimar a evapotranspiração nas condições do Alto Paranaíba, MG, nos meses de agosto de 2008 a maio de 2009; e (c) analisar, mensalmente, os efeitos das interações dos elementos meteorológicos temperatura máxima, temperatura mínima, umidade relativa, velocidade do vento e radiação na evapotranspiração estimada pelo Irrigâmetro operando com diferentes alturas do nível de

água no evaporatório. O estudo foi conduzido numa estação experimental da Universidade Federal de Viçosa, localizada no Campus de Rio Paranaíba, no Município de Rio Paranaíba, MG. O experimento foi montado em delineamento inteiramente casualizado com seis tratamentos e três repetições. Os tratamentos consistiram de Irrigômetros equipados individualmente com evaporatórios operando com água nas alturas N1 = 1, N2 = 2, N3 = 3, N4 = 4, N5 = 5 e N6 = 6 cm, tomadas a partir de um nível de referência próprio do aparelho, totalizando 18 Irrigômetros. O coeficiente  $K_I$  foi obtido pela relação entre a estimativa de evapotranspiração da cultura obtida no Irrigômetro e a evapotranspiração de referência obtida pelo método de Penman-Monteith-FAO 56. A análise do desempenho do Irrigômetro para estimar a evapotranspiração de referência foi feita comparando-se os resultados do aparelho com os obtidos pela equação de Penman-Monteith-FAO 56. A hierarquização das estimativas da evapotranspiração foi feita com base nos valores do erro-padrão da estimativa (SEE), do coeficiente de determinação ( $r^2$ ) e dos parâmetros da equação (a e b) das respectivas regressões lineares simples. A melhor alternativa foi aquela que apresentou maior  $r^2$ , menor SEE e b próximo da unidade. A exatidão foi dada pelo índice de concordância de Willmott, representado pela letra “d”, em que os valores variam de zero para nenhuma concordância a 1 para a concordância perfeita. Para avaliar os efeitos direto e indireto de cada componente climático sobre a evapotranspiração estimada pelo Irrigômetro, utilizou-se a análise de trilha, em que a evapotranspiração foi a variável dependente e os elementos do clima, as variáveis independentes. O coeficiente do Irrigômetro aumentou com a elevação do nível da água dentro do evaporatório, onde os níveis de água indicados para se estimar a evapotranspiração de referência foram: 4,1; 4,0; 3,6; 3,8; 3,3; 3,0; 2,5; 3,3; 3,0 e 2,9 cm nos meses de agosto, setembro, outubro, novembro, dezembro, janeiro, fevereiro, março, abril e maio, respectivamente. Pela análise de trilha, os elementos climatológicos que apresentaram maior correlação com a estimativa da evapotranspiração do Irrigômetro foram a umidade relativa, dos meses de agosto e janeiro, temperatura mínima e umidade relativa (no mês de setembro), temperatura máxima e umidade relativa (no mês de outubro) e temperatura mínima (no mês de maio). A menor correlação com a variável principal foi apresentada pela variável velocidade do vento, sendo não significativa a 1 e 5% de probabilidade, pelo teste t.

## ABSTRACT

OLIVEIRA, Ednaldo Miranda de, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, July of 2009. **Performance Irrigameter in the estimation of reference evapotranspiration in the region of the Alto Paranaíba-MG.** Adviser: Rubens Alves de Oliveira. Co-advisers: Gilberto Chohaku Sedyama, Paulo Roberto Cecon and Luis César Dias Drumond.

Quantifying the water consumption by crops and the correct scheduling for its application are valuable issues to the irrigation management. It was developed at the Federal University of Viçosa an evapo-pluviometric equipment named Irrigâmetro, which allows measuring the evapotranspiration and the precipitation, providing the right time to irrigate, the running time for the irrigation system or its speed as well. The objectives of this research were: (a) to determine the coefficient of Irrigameter ( $K_I$ ) to the 1, 2, 3, 4, 5 and 6 cm water depths in the evaporator, for 1, 3, 5 and 7 days intervals; (b) evaluate the performance of the Irrigameter estimating the reference evapotranspiration in the climate of the Alto Paranaíba-MG, in August 2008 to May of 2009, and (c) evaluate the interactions of the meteorological elements maximum temperature, minimum temperature, relative humidity, wind speed and radiation on the reference evapotranspiration estimated by the Irrigameter, operating with different depths of water in the evaporator. The study was conducted at the experimental station of the Federal University of Viçosa, located in the campus of Rio Paranaíba in the

municipality of Rio Paranaíba, MG. The experiment was carried out in a completely randomized design with six treatments and three replications. The treatments consisted of Irrigameters equipped with evaporator operating with the following water depths: N1 = 1, N2 = 2, N3 = 3, N4 = 4, N5 = 5 and N6 = 6 cm, taken from the own equipment reference level, totaling 18 Irrigâmetros. The  $K_I$  coefficient was obtained by the ratio between estimated crop evapotranspiration obtained by the Irrigameter and reference evapotranspiration obtained by the Penman-Monteith - FAO 56 method. The analysis of the performance of the Irrigameter to estimate the reference evapotranspiration was made comparing the results with those obtained from the device to the equation Penman-Monteith - FAO 56. The ranking of the evapotranspiration estimative was based on the values of the standard estimative error (SEE), coefficient of determination ( $r^2$ ) and the equation parameters (a and b) of the linear regressions. The best alternative was the one that had higher  $r^2$ , lower SEE and b near to the unit. The accuracy was amended by the WILLMOT agreement index, represented by the letter "d", where the values range from zero for no agreement to 1 for perfect agreement. To evaluate the direct and indirect effects of each climatic component on the evapotranspiration estimated by the Irrigameter, the path analysis was used, where evapotranspiration was the dependent variable and the climatic elements were the independent variables. The coefficient of Irrigameter increased with the increase of water level within the evaporator, for all time intervals. The water depth in evaporator to estimate the evapotranspiration of reference were: 4.1, 4.0, 3.6, 3.8, 3.3, 3.0, 2.5, 3.3, 3, 0 and 2.9 cm for the months of August, September, October, November, December, January, February, March, April and May, respectively. For the path analysis, the climatic factors that had high correlation with the estimate of the evapotranspiration of Irrigameter were the relative humidity for the months of August and January, minimum temperature and relative humidity for the month of September, maximum temperature and relative humidity, for the month of October and minimum temperature for the month of May. The lowest correlation with the main variable was presented by the variable wind speed, and not significant at 1 and 5% probability by the test t.

## 1. INTRODUÇÃO

A água é essencial à vida e, sendo um recurso natural de valor inestimável, apresenta utilidades múltiplas, como a geração de energia, abastecimentos residencial e industrial e para irrigação, navegação, recreação, turismo, aquicultura, piscicultura e pesca.

O uso racional dos recursos hídricos é uma demanda da sociedade atual, motivada, por um lado, pela escassez em algumas regiões e, por outro, pela premência de conservação dos recursos para as gerações futuras.

Para acompanhar o crescimento da população mundial, segundo previsões das Nações Unidas, no ano 2025 será necessária uma expansão de 40 a 45% na produção de alimentos (PAZ et al., 2000). A agricultura irrigada, que atualmente compreende 18% de todas as terras cultivadas, responde por cerca de 44% do alimento produzido no mundo, sendo um componente essencial na estratégia de crescimento da produção mundial de alimentos (CHRISTOFIDIS, 2008b). Segundo este autor, a agricultura irrigada consome aproximadamente 70% da água utilizada pelo homem, sendo, notadamente, uma das atividades que mais utilizam a água. Isso evidencia a necessidade de os irrigantes, principais usuários, manejarem esse recurso com a maior eficiência possível, pois as reservas de água utilizável estão cada vez mais escassas.

No Brasil, a água utilizada na irrigação tem recebido tratamento especial, haja vista que é responsável por grande parcela do consumo total, pois cerca de 61% da água captada é usada na agricultura para a produção de alimentos (ANA, 2007), mas ressalta-se que a área irrigada em 2003/2004, estimada em 3,44 milhões de hectares, equivalia a

aproximadamente 6% da área total plantada (CHRISTOFIDIS, 2008a). Um desafio essencial na agricultura irrigada é o da necessidade de redução das perdas nos sistemas de irrigação, sejam perdas de água nos sistemas de condução e distribuição pelas infraestruturas hídricas, sejam perdas devido à prática de manejo inadequado da irrigação. A escolha dos métodos de irrigação mais adequados é crucial para os irrigantes, pois possibilitará um manejo mais eficiente, com práticas voltadas para sustentabilidade das atividades.

Na maioria das áreas irrigadas, é comum observar ausência de manejo racional da água, geralmente resultando em aplicação excessiva, com desperdício de água e energia, além da ocorrência de problemas ambientais, ou em deficiência hídrica das plantas, com baixa produtividade e prejuízos econômicos ao produtor. Práticas adequadas como adoção de sistema de manejo e aferição dos sistemas de irrigação contribuem para aumentar a produtividade e melhorar a qualidade dos produtos agrícolas, otimizando o uso de água e energia e preservando os recursos hídricos e o solo (ESPÍNDULA NETO, 2002).

A técnica do manejo da irrigação consiste em determinar o momento apropriado de irrigar e o tempo indicado para o funcionamento do equipamento de irrigação, no caso de sistemas de irrigação por aspersão e localizada, ou a velocidade de deslocamento do sistema de irrigação, no caso de sistemas pivô central e linear, com a finalidade de aplicar a quantidade de água necessária a uma boa resposta econômica da cultura. É uma prática ainda pouco aplicada pela maioria dos produtores.

A determinação do consumo de água nos diversos estágios de desenvolvimento das culturas é fundamental no manejo da irrigação, podendo ser obtida a partir de medições efetuadas no solo, na planta e na atmosfera. Os métodos baseados em medições no solo se fundamentam 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 e da temperatura da folha, entre outros; já os métodos baseados no clima consideram, desde simples medições da evaporação da água num tanque, como o tanque Classe “A”, até complexas equações para estimativa da evapotranspiração (ROCHA et al., 2003).

A evapotranspiração pode ser definida como a quantidade de água evaporada e transpirada de uma superfície vegetada durante determinado período. Também pode ser expressa em valores totais, médios, diários e horários, em volume por unidade de área ou em lâmina de água, em período predeterminado (BERNARDO et al., 2007).

O conhecimento e quantificação do processo de evapotranspiração definem a quantidade de água necessária para as culturas, sendo, por isso, parâmetro fundamental para o planejamento e manejo da irrigação (SEDIYAMA, 1996). A determinação das necessidades hídricas das culturas é usualmente estimada com base nos valores da evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ).

Em razão dos diversos métodos para estimativa da  $ET_0$ , a escolha do mais adequado depende da disponibilidade de dados meteorológicos, do nível de precisão exigido, da finalidade - se manejo da irrigação em nível de propriedade agrícola ou pesquisa científica - e do custo de aquisição de equipamentos. Esses fatores têm levado pesquisadores a desenvolver métodos alternativos e mais simples para determinação da evapotranspiração para fins práticos de manejo da água de irrigação, com o objetivo de baixar custos e que seja de fácil manuseio e apresentem precisão e consistência científica.

Nesse contexto, uma equipe de pesquisadores da Universidade Federal de Viçosa (UFV) desenvolveu um aparelho denominado Irrigâmetro, para uso na otimização do manejo da irrigação. Essa otimização é importante para a sociedade como um todo, tanto do ponto de vista ambiental, economizando água e energia e evitando degradação do meio ambiente, quanto do ponto de vista de geração de renda para o produtor rural, reduzindo custos e aumentando a produtividade das culturas e a disponibilidade de alimentos de melhor qualidade.

O Irrigâmetro é capaz de estimar a evapotranspiração com confiabilidade, sendo esse processo dependente das interações dos diversos elementos meteorológicos e suas inter-relações associadas ao correto ajuste do aparelho. Muitas pesquisas foram desenvolvidas utilizando os métodos de manejo da irrigação mais antigos, encontrando-se, assim, grande quantidade de informações na literatura relativas a esses métodos e suas características. Comparado a esses métodos, o Irrigâmetro é um aparelho recém-desenvolvido que necessita de pesquisas para maior conhecimento dessa nova tecnologia e possibilitar seu uso com maior eficiência. Assim, pesquisas conduzidas em regiões com condições climáticas diferentes permitirão identificar quais elementos climáticos (temperatura máxima, temperatura mínima, umidade relativa, velocidade do vento e radiação) são mais relevantes na evapotranspiração estimada pelo aparelho, com avaliação dos efeitos diretos e indiretos desses elementos, possibilitando ajustes mais precisos do aparelho em uma condição climática específica.



A obtenção de informações relativas à influência de elementos meteorológicos no processo da evapotranspiração estimada pelo Irrigâmetro é importante para o entendimento das relações físicas e dos aspectos micrometeorológicos das diferentes regiões e ambientes do planeta, possibilitando um estudo mais seguro para estimar a evapotranspiração das culturas, permitindo aos irrigantes ser mais criteriosos na prática do manejo da irrigação.

Nesse contexto, este trabalho teve os seguintes objetivos:

- Avaliar o desempenho do Irrigâmetro na estimativa da evapotranspiração de referência para a região do Alto Paranaíba, MG.
- Determinar o coeficiente do Irrigâmetro ( $K_I$ ) mensalmente para diferentes alturas do nível de água no evaporatório, com base na estimativa de evapotranspiração obtida no Irrigâmetro e na evapotranspiração de referência obtida pelo método de Penman-Monteith-FAO 56.
- Analisar os efeitos das interações dos elementos climáticos (temperatura máxima, temperatura mínima, umidade relativa, velocidade do vento e radiação) mensalmente, na evapotranspiração estimada pelo Irrigâmetro operando com diferentes alturas do nível de água no evaporatório.

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1. Estimativa da evapotranspiração de referência**

A evapotranspiração e a precipitação efetiva, ou seja, aquela que realmente é disponível para a planta, são parâmetros importantes para o cálculo da necessidade de irrigação. A evapotranspiração inclui a evaporação da água do solo e a evaporação da água depositada nas folhas, que pode ter origem no orvalho ou na irrigação, e a transpiração vegetal.

O consumo de água envolvido no processo de evapotranspiração é influenciado por diversos fatores, entre eles a ação combinada dos elementos meteorológicos, como a radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa do ar e velocidade do vento, índice de área foliar e quantidade de água prontamente disponível no solo (DOORENBOS e PRUITT, 1977; MEDEIROS, 1992). De maneira geral, as taxas de evaporação e transpiração aumentam com a maior disponibilidade de energia solar, maior temperatura do ar, maior velocidade do vento, menor umidade relativa e maior índice de área foliar.

Segundo Doorenbos e Pruitt (1977), evapotranspiração de referência é aquela de uma extensa superfície de grama com altura de 0,08 a 0,15 m, em crescimento ativo, cobrindo totalmente o solo e sem deficiência de água e nutrientes. A evapotranspiração de referência assim definida coincide com a evapotranspiração potencial. O valor obtido com alfafa pode diferir daquele conseguido com grama em função do albedo e da rugosidade das duas superfícies, se as áreas cultivadas forem suficientemente extensas.

A evapotranspiração pode ser estimada de diferentes maneiras. De acordo com Burman et al. (1983), ela pode ser obtida a partir de medidas diretas ou estimada a partir de elementos climáticos, utilizando-se de modelos ou métodos teóricos empíricos. No primeiro grupo estão incluídos os diferentes tipos de lisímetros e o balanço de água no solo, já no segundo estão enquadrados, conforme Jensen et al. (1990), os métodos de Penman, Thornthwaite, Blaney-Criddle, Jensen-Haise, Priestley-Taylor e Hargreaves, entre outros, e também os evaporímetros tanque Classe A e o atmômetro modificado.

A evapotranspiração pode ser obtida por medidas diretas, utilizando-se lisímetros, que são grandes reservatórios cheios de solo localizados no campo, para representarem o ambiente local, com superfície coberta por vegetação ou solo nu, para estimativa da evapotranspiração de uma cultura de referência ou, ainda, da evaporação em um solo descoberto. Para Bernardo (1992) e Amorim (1998), o método do lisímetro é muito preciso e considerado instrumento-padrão para a estimativa da evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ).

O tanque Classe A foi um método indireto muito utilizado para estimativa da  $ET_0$  no manejo da água de irrigação. Segundo Sedyama (1996), o maior uso desse equipamento é devido à sua praticidade e aos baixos custos de instalação e manutenção. De acordo com Smith (1991), quando bem conduzido esse método oferece resultados confiáveis na estimativa da evapotranspiração de referência.

Utilizando tanque Classe “A” na determinação da evaporação e estimativa da evapotranspiração, Amorim (1998) não obteve resultados satisfatórios para valores diários; porém, com o uso de médias de cinco dias, esses equipamentos apresentaram resultados significativos. Jensen et al. (1990) recomendaram o uso do tanque Classe “A” para períodos de tempo superiores a sete dias. O método se baseia na medição da evaporação da água num tanque padronizado, cujo valor é convertido em evapotranspiração de referência, por meio de coeficientes específicos dependentes do clima da região, do tipo de tanque e da bordadura circundante (DOORENBOS e PRUITT, 1977), de acordo com a expressão:

$$ET_0 = K_t \cdot E_v \quad (1)$$

em que:

$ET_0$  = estimativa da evapotranspiração de referência, mm;

$K_t$  = coeficiente do tanque, adimensional; e

$E_v$  = evaporação medida no evaporímetro, mm.

A estimativa da evapotranspiração de referência constitui fator básico para quantificar o total de água necessário para a cultura durante o seu ciclo. As plantas, nos seus diferentes estágios de desenvolvimento, apresentam diferentes necessidades de água, podendo ser quantificada por:

$$ET_c = K_c \cdot ET_0 \quad (2)$$

em que:

$ET_c$  = estimativa da evapotranspiração da cultura, mm; e

$K_c$  = coeficiente da cultura, adimensional.

O coeficiente da cultura ( $K_c$ ) varia com o tipo de cultura e a sua fase de desenvolvimento, com as condições climáticas e com os tratos culturais, como descrito no Boletim FAO 56 (ALLEN et al., 1998).

Pereira et al. (1997) citaram os experimentos de Sleight (1917), que trabalhou com tanques evaporímetros de várias dimensões e enterrados com borda a 0,08 m acima do nível do solo e profundidade da água igual a 0,83 m, mostrando que a taxa de evaporação diminui, exponencialmente, com o aumento da área do tanque. No tanque de 0,305 m de diâmetro, a água evaporou cerca de 55% mais do que no tanque de 3,66 m. Esse autor verificou, também, que ao se manter a área fixa, com diâmetro igual a 0,61 m e a altura do nível de água variando entre 0,08 e 1,75 m, não houve diferença significativa na evaporação.

Tagliaferre (2007), avaliando dois minievaporímetros UFV-1 e UFV-2, observou que o aumento no diâmetro dos evaporatórios, de 97 para 244 mm, reduziu a evaporação de 6,15 para 4,2 mm  $d^{-1}$  e de 4,92 para 4,50 mm  $d^{-1}$ , respectivamente, bem como concluiu que, à medida que aumentou o diâmetro do evaporatório dos dois tipos de minievaporímetros, a evaporação diminuiu exponencialmente.

Segundo Allen (1986) e Allen et al. (1998), o método de Penman-Monteith-FAO 56 inclui todos os parâmetros que governam a troca de energia e o correspondente fluxo de calor latente (evapotranspiração) para a vegetação uniforme e extensa. Os parâmetros são medidos ou podem ser, em sua maioria, calculados prontamente a partir de dados meteorológicos. A equação pode ser utilizada para o cálculo direto da evapotranspiração

de qualquer cultura, conforme as resistências de superfície e aerodinâmica da cultura específica.

Allen et al. (1998) recomendaram a adoção do modelo de Penman-Monteith como padrão de cálculo da evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ), por apresentar estimativas confiáveis e consistentes de  $ET_0$ , sendo considerado aquele de melhor desempenho entre os métodos combinados.

$$ET_0 = \frac{0,408 \Delta(R_n - G) + \gamma \frac{37}{T_a + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + CdU_2)} \quad (3)$$

em que:

$ET_0$  = evapotranspiração de referência,  $\text{mm h}^{-1}$ ;

$R_n$  = saldo de radiação na superfície,  $\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ;

$G$  = densidade do fluxo de calor no solo,  $\text{MJ m}^{-2} \text{h}^{-1}$ ;

$T_a$  = temperatura do ar de hora em hora,  $^{\circ}\text{C}$ ;

$U_2$  = velocidade do vento a 2 m de altura,  $\text{m s}^{-1}$ ;

$e_s$  = pressão de saturação de vapor, kPa;

$e_a$  = pressão parcial de vapor, kPa;

$e_s - e_a$  = déficit de pressão de saturação de vapores, kPa;

$\Delta$  = declividade da curva de pressão de saturação de vapor,  $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ;

$\gamma$  = coeficiente psicrométrico,  $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ; e

$Cd$  = coeficiente de resistência de superfície/aerodinâmica.

A equação anterior é uma representação dos fatores que governam o processo de evapotranspiração e definem a evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) com base em uma cultura hipotética com altura de 0,12 m e coeficiente de reflexão ou albedo de 0,23, assemelhando-se à evaporação de extensa superfície de grama verde, com altura uniforme, de crescimento ativo e adequada umidade do solo (ALLEN et al., 1994; SEDIYAMA, 1996).

Ley et al. (1994ab) citaram que, quando a medição dos elementos meteorológicos é feita por estações meteorológicas automáticas, é comum a ocorrência de erros decorrentes da calibração dos sensores dos equipamentos utilizados para essas medições, comprometendo, dessa forma, a determinação dos componentes necessários à

estimativa da evapotranspiração, por meio de equações. Segundo esses autores, quando as medições advêm de estações meteorológicas convencionais, os erros são ainda maiores, pois se acrescentam aos erros instrumentais os erros devidos ao observador.

## **2.2. Manejo da irrigação**

Na agricultura irrigada, a decisão sobre o momento apropriado e a quantidade adequada de água a ser aplicada são geralmente baseadas na prática do agricultor, conduzindo à sua falta ou excesso para a cultura. O consumo crescente de água em razão do aumento populacional e de seus diversos usos conduz à escassez desse recurso natural, exigindo técnicas e procedimentos para a sua racionalização, principalmente no uso agrícola.

O manejo da irrigação é o conjunto de técnicas utilizadas para decidir o momento indicado para irrigar e o tempo de funcionamento do sistema de irrigação, a fim de aplicar a quantidade de água necessária ao pleno desenvolvimento das culturas. Essa prática se mostra um dos principais meios para otimização da produção agrícola e conservação da água e energia, além de ser essencial para melhorar o desempenho e a sustentabilidade de sistemas de irrigação. De acordo com estudo realizado pela Companhia Energética de Minas Gerais – CEMIG (1993), se a irrigação fosse utilizada de forma racional, aproximadamente 20% da água e 30% da energia consumida seriam economizadas.

Segundo Contin (2008), atualmente os agricultores irrigantes dispõem de uma série de metodologias, no que diz respeito ao manejo da irrigação. Esse mesmo autor citou que o nível tecnológico da propriedade agrícola determinará a escolha da estratégia de manejo da irrigação. Agricultores que exploram culturas de alto valor econômico podem adotar e investir em técnicas mais sofisticadas.

Mesmo agricultores que usam níveis mais baixos de tecnologia, como a agricultura familiar, que representa cerca de 77% dos estabelecimentos agropecuários do país, de acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (SOUZA FILHO, 2004), podem usufruir, portanto, de técnicas de manejo da irrigação, como a adoção de um calendário de irrigação baseado em condições médias de solo/clima/cultura, controle operacional simplificado, que pode basear-se em intervalos fixos e aplicação constante de água, ou a utilização de equipamentos próprios para o manejo da irrigação, desde que de mais fácil acesso e utilização.

O principal objetivo da irrigação é promover aumento de produtividade e qualidade e conseqüente aumento de rentabilidade na propriedade agrícola, isto é, garantir que o incremento nos rendimentos sejam maiores que a adição de custos. Porém, os riscos do uso dessa tecnologia devem ser criteriosamente analisados, visto que a irrigação vai muito além da aplicação de água ao sistema produtivo agrícola, pois a agricultura irrigada se torna um novo sistema de produção que deve ser tratado de maneira diferenciada, em que o aumento da rentabilidade da propriedade agrícola só ocorrerá se houver interação entre os diferentes componentes do sistema produtivo (SANTOS, 2004).

### **2.3. Irrigâmetro**

O Irrigâmetro apresenta grande potencial de uso na agricultura irrigada, pois, além de diversas vantagens, ele fornece resposta prática às duas perguntas básicas do manejo de irrigação: quando e quanto irrigar. Assim, o irrigante não precisa ter conhecimentos técnicos especializados sobre irrigação. De acordo com os resultados obtidos por Oliveira et al. (2007a), Oliveira et al. (2007b), Oliveira et al. (2008), Tagliaferre (2006) e Tagliaferre (2007), o Irrigâmetro pode ser usado para estimar a evapotranspiração de qualquer cultura, em qualquer estágio de desenvolvimento, para um valor de  $K_c$  desejado. Sendo assim, o uso do Irrigâmetro torna-se alternativa viável, por ser de custo mais baixo que o tanque Classe “A” e a estação meteorológica automática e, principalmente, por ser de fácil operação.

Há um pluviômetro integrado ao Irrigâmetro que permite medir a lâmina precipitada, sabendo-se, rapidamente, se ela foi suficiente ou não para suprir o déficit hídrico do solo. A operação desse aparelho consiste basicamente na abertura e fechamento de válvulas nele existentes, conforme indicado no manual do fabricante (OLIVEIRA e RAMOS, 2008). O Irrigâmetro é um equipamento versátil que pode ser ajustado para estimar a evapotranspiração de referência ou a evapotranspiração da cultura, em qualquer estágio de seu desenvolvimento, com uso indicado no manejo da água na agricultura irrigada.

De acordo com Oliveira e Ramos (2008), o manejo correto da irrigação com o uso do Irrigâmetro é realizado com o monitoramento de três escalas integradas ao aparelho. A escala laminar, que se constitui numa graduação impressa no próprio tubo de alimentação do aparelho, possui a função de medir a lâmina de água evaporada que

devido aos ajustes do próprio aparelho, representa a lâmina evapotranspirada. A escala da régua de manejo (sem graduação) tem quatro faixas verticais de colorações azul, verde, amarelo e vermelho, com a função de indicar o momento da irrigação, cujo modelo é dependente da sensibilidade da cultura ao déficit hídrico e de características físico-hídricas do solo da área irrigada. Tem-se, também, a escala da régua temporal ou percentual, que é graduada em horas e minutos ou em porcentagem, respectivamente, sendo o modelo dessa régua indicado de acordo com as características de aplicação de água do sistema de irrigação. Essa régua indica o tempo de funcionamento, no caso de aspersão convencional ou localizada, ou a velocidade de deslocamento do sistema de irrigação, no caso de pivô central ou sistema linear.

Na régua de manejo, as quatro faixas coloridas são indicadoras do momento de irrigar. Quando o nível da água no interior do tubo de alimentação se encontra na direção da faixa azul ou da faixa verde, é sinal de alta e boa disponibilidade de água no solo, respectivamente, não havendo necessidade de irrigar; na direção da faixa amarela, é recomendável irrigar e, caso o nível de água abaixe a ponto de atingir a faixa vermelha, o Irrigâmetro estará apontando ao produtor que o momento da irrigação já passou, podendo ocorrer redução na produtividade ou na qualidade da cultura que está sendo irrigada.

A estimativa do consumo de água das culturas pelo Irrigâmetro, nos diferentes estádios de desenvolvimento das plantas, baseia-se na variação do nível da água no evaporatório do equipamento. Na fase inicial de desenvolvimento (fase I), o nível da água no evaporatório é o mais baixo, em razão do menor consumo de água da cultura nesse período. A fase de florescimento e enchimento de grãos (fase III) caracteriza-se pelo maior consumo de água pela cultura durante o ciclo, sendo o nível de água no evaporatório o mais alto (CONTIN, 2008).

#### **2.4. Análise de trilha**

A evapotranspiração é dependente dos elementos meteorológicos, do solo e da planta (LEMON et al.,1957). De acordo com Penman (1956), quando a cobertura do solo é completa, a evapotranspiração é condicionada, principalmente, pelos elementos meteorológicos. Entre esses elementos, o saldo de radiação é o que exerce maior influência na taxa de evapotranspiração dos cultivos. No entanto, Villa Nova (1987) ressaltou que é difícil separar a ação de cada um desses elementos, pois eles agem



simultaneamente. De maneira geral, quanto maior a disponibilidade de energia solar e maiores a temperatura do ar e a velocidade do vento e quanto menor a umidade relativa do ar, maior deverá ser a demanda evaporativa da atmosfera, e isso ocasionará aumento na taxa de evapotranspiração quando a umidade do solo não for fator restritivo. Em regiões onde ocorrem advecções fortes, a importância relativa da radiação líquida decresce, e a advecção ou transferência de calor sensível das áreas circunvizinhas poderá contribuir para o processo evapotranspirativo com energia até maior que aquela disponível à área considerada, aumentando, dessa forma, a importância da velocidade do vento e da umidade relativa do ar na evapotranspiração.

Para entender melhor as associações entre diferentes variáveis em estudo, Wright (1921) propôs um método de desdobramento dos coeficientes de correlação, denominado análise de trilha ou análise de caminamento. A análise de trilha consiste no estudo dos efeitos diretos e indiretos de variáveis explicativas sobre uma variável básica, cujas estimativas são obtidas por meio de equações de regressão, constituindo-se numa expansão da regressão múltipla, em que as variáveis são previamente padronizadas.

A importância da correlação entre variáveis reside no fato de se poder avaliar quanto da alteração de uma variável pode afetar as demais, todavia podem também ocorrer alguns equívocos na quantificação da magnitude das correlações entre as variáveis. A alta correlação entre duas variáveis pode ser o resultado de uma terceira sobre elas, ou de um grupo de variáveis (CRUZ e REGAZZI, 1997). Assim, apesar da utilidade dessas estimativas no entendimento de uma variável complexa como a evapotranspiração, elas não determinam a importância relativa das influências diretas e indiretas das diversas variáveis explicativas que compõem a variável principal.

Quando essas variáveis estão correlacionadas entre si, diz-se que há inter-relação ou multicolinearidade. De modo geral, as análises de trilha não têm considerado os efeitos adversos da multicolinearidade sobre os estimadores de quadrados mínimos, adotados para resolução dos sistemas de equação. Dessa forma, os resultados podem não ser confiáveis (CARVALHO, 1994).

A multicolinearidade ocorre quando uma matriz quadrada possui determinante nulo, conhecida como matriz singular. Isso acontece quando, na matriz de correlação, há presença de relação linear entre todos os elementos de uma linha ou coluna. A matriz singular não possui matriz inversa, sendo esta essencial para o desdobramento da correlação de Pearson em efeitos diretos e indiretos.

Os problemas causados pela multicolinearidade não são devidos simplesmente à sua presença, mas sim ao grau que se manifesta. Existindo multicolinearidade, em níveis considerados moderados a severos, entre um conjunto de variáveis explicativas, torna-se difícil avaliar a influência destas sobre a resposta na variável principal, e ignorar seus efeitos pode redundar em resultados danosos ou absurdos (CRUZ e REGAZZI, 1994).

Diagnósticos de multicolinearidade devem, dessa forma, ser feitos de maneira a viabilizar certos estudos. Carvalho (1995) ressaltou a importância desse estudo quando se tem o objetivo de realizar análise de regressões, de trilha e de correlações parciais, entre outras.

A análise de trilha, nos casos em que se considera um único modelo causal, é simplesmente uma análise de regressão parcial padronizada, sendo útil no desdobramento dos coeficientes de correlação em efeitos direto e indireto.

De acordo com Cruz e Regazzi (1994), os coeficientes de trilha (efeito direto) podem ser comparados entre si e com o efeito da variável residual, que é utilizado como referencial para a importância do efeito direto da variável explicativa sobre a principal. Quando o coeficiente de trilha (efeito direto) de uma variável explicativa for, em módulo, menor que o coeficiente da variável residual, mas o coeficiente de determinação (efeito total) for maior que o da variável residual, significa que essa variável explicativa influencia a variável principal apenas indiretamente, sendo sua importância só em conjunto. Se o coeficiente de trilha for, em módulo, maior que o coeficiente da variável residual, há evidências de que existe efeito direto da variável explicativa sobre a principal.

De acordo com Silveira (2002), trabalhando com a análise dos componentes principais na investigação da estrutura multivariada da evapotranspiração no Estado do Ceará, as variáveis climatológicas estudadas com maior peso no processo da evapotranspiração foram a razão de insolação ( $n/N$ ) e a umidade relativa (UR). Na região Centro-Sul, também no Ceará, Andrade et al. (2003) revelaram que as variáveis climatológicas investigadas com maior representatividade no processo da evapotranspiração foram a razão de insolação ( $n/N$ ) e a velocidade do vento (V), enquanto a temperatura máxima do ar ( $T_{max}$ ) e a temperatura mínima do ar ( $T_{min}$ ) apresentaram menor influência.

Em estudo realizado na região de Viçosa, MG, Caixeta (2009) observou que o efeito indireto da variável temperatura máxima via radiação se destacou como o mais

associado à evapotranspiração em todos os níveis de água no evaporatório do Irrigâmetro. De acordo com esse autor, houve relação direta entre a variável dependente evapotranspiração estimada pelo Irrigâmetro e a variável explicativa temperatura máxima. O efeito direto da temperatura máxima foi elevado, tanto quanto o efeito indireto da temperatura máxima via radiação, uma vez que essas variáveis são significativamente correlacionadas. Já as variáveis temperatura mínima, velocidade do vento e umidade relativa do ar apresentaram efeitos diretos baixos. O referido autor concluiu que as variáveis temperatura máxima e radiação foram as principais determinantes na composição da evapotranspiração estimada pelo Irrigâmetro (ET); contudo, somente a radiação apresentou relação nítida de causa e efeito, sendo o principal elemento meteorológico na tentativa de explicar a variável dependente (ET).

Amorim (1998), estudando as ligações da evapotranspiração com os elementos climáticos no Município de Governador Dix-Sept Rosado, situado na região agrícola de Mossoró, RN, observou que a insolação foi o elemento meteorológico de maior influência no processo de evapotranspiração e a temperatura média compensada o elemento que apresentou menor efeito no processo.

Segundo Medeiros (2002), os principais elementos climáticos que proporcionam energia para evaporação e remoção de vapor de água a partir de superfícies evaporantes são: radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa, velocidade do vento e déficit de pressão de vapor. Desses, a radiação solar é o elemento de maior importância na demanda evaporativa da atmosfera.

A influência isolada dos elementos meteorológicos na evaporação de superfícies de água livre, como nos tanques evaporímetros, é difícil de ser quantificada. Hounam (1973) citou que a evaporação da água em tanques não é função apenas das condições climáticas durante determinado período, mas também das características do reservatório e do calor advectivo provenientes de áreas secas adjacentes. Essas características se inter-relacionam com as condições climáticas, dificultando a medição da sua influência na evaporação.

### **3. MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1. Local e caracterização do experimento**

Este estudo foi conduzido na estação experimental da Universidade Federal de Viçosa, Campus de Rio Paranaíba, situada no Município de Rio Paranaíba, MG, entre agosto de 2008 e maio de 2009. As coordenadas geográficas do Município são 19° 12' 50" de latitude sul e 46° 07' 14" de longitude oeste e altitude de 1.090 m.

Na área experimental foram instalados 18 Irrigômetros, dispostos lado a lado e espaçados de 2,5 por 1,5 m, com o braço do aparelho voltado para o norte, de maneira que não houvesse sombreamento nos evaporatórios (Figuras 1, 2 e 3).

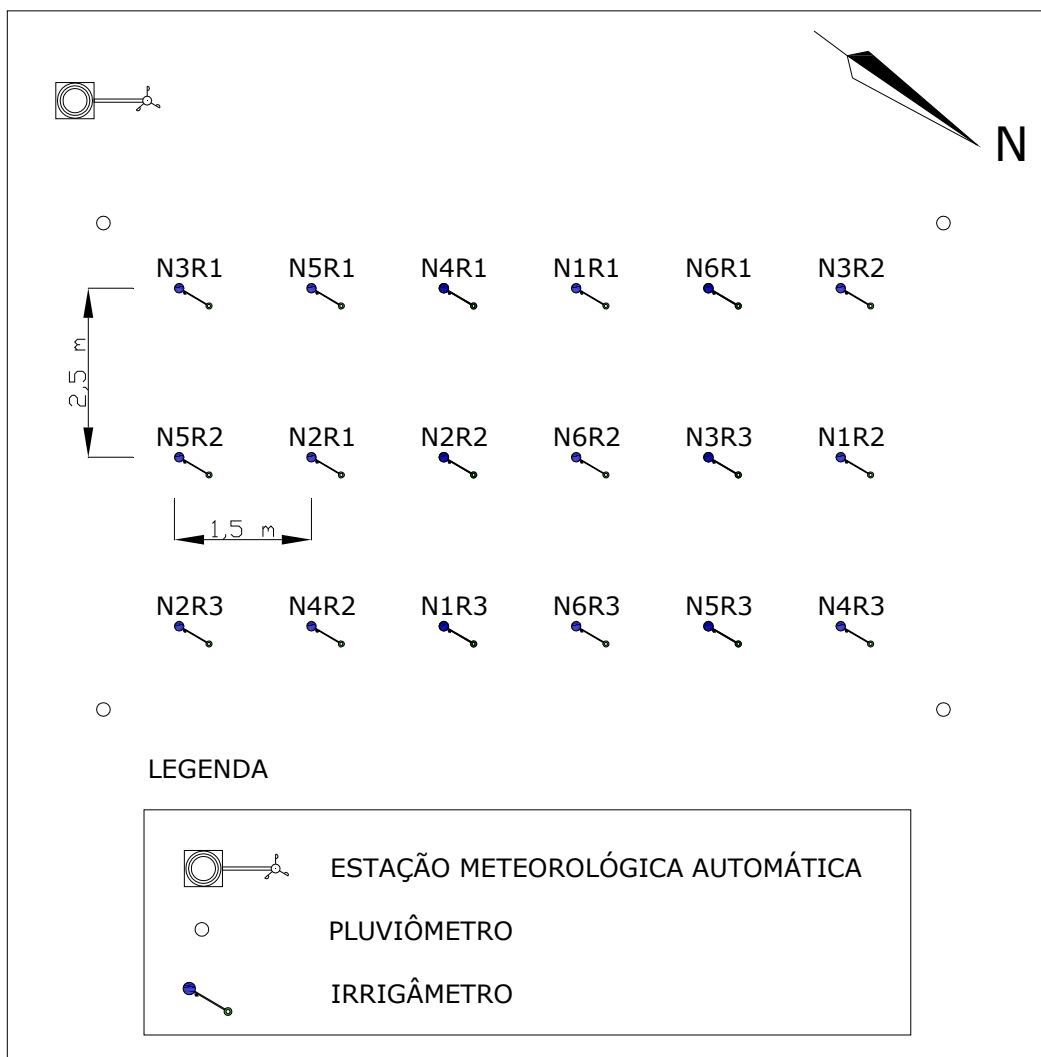
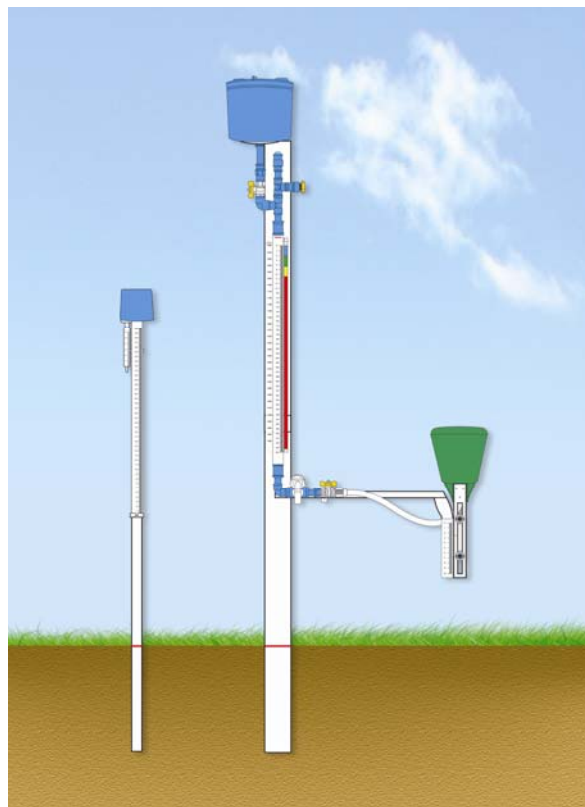


Figura 1 - Disposição dos Irrigômetros, dos pluviômetros e da estação meteorológica automática na área experimental.

Foi instalada também, na mesma área, uma estação meteorológica automática da marca DAVIS, modelo Vantage Pro II, utilizada para coleta dos dados horários de radiação, umidade relativa, velocidade do vento e temperaturas máxima e mínima do ar, necessários para a estimativa da evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ).



Figura 2 - Vista da área experimental.



Fonte: OLIVEIRA e RAMOS, 2008

Figura 3 - Representação do Irrigâmetro equipado com evaporatório (direita) e pluviômetro (esquerda).

Na análise dos resultados foram excluídos os dias com ocorrência de precipitação pluvial, para manter a integridade dos dados, visto que a chuva altera o nível da água no evaporatório do Irrigâmetro e a restituição do nível original nem sempre ocorria logo após o término da chuva.

Dependendo das condições meteorológicas do período noturno, podem ocorrer condensação e deposição de orvalho na parede do evaporatório, com possível escoamento de água para o seu interior, o que pode alterar o nível originalmente estabelecido. Diariamente era feita a leitura nos Irrigômetros, e, quando ocorria esse escoamento do orvalho, retirava-se o excesso de água do evaporatório e fazia-se uma nova leitura, de maneira que não foi necessário quantificar o orvalho.

O evaporatório do Irrigâmetro é de material termoplástico, com formato cônico (Figura 4), contendo água no seu interior com a superfície exposta à atmosfera. O fundo do evaporatório é conectado a uma válvula instalada na base do tubo de alimentação, por meio de um tubo flexível.



Figura 4 - Corte longitudinal do evaporatório do Irrigâmetro, observando-se o seu formato cônico.

O tubo de alimentação possui escala graduada em milímetros, o que possibilita a obtenção das leituras da lâmina evapotranspirada. Internamente no tubo de alimentação há outro de diâmetro menor, denominado de tubo borbulhamento, que mantém o nível da água constante no evaporatório. Na extremidade inferior do tubo de alimentação há uma válvula de drenagem, usada para retirar a água do interior do tubo de borbulhamento e o excesso no tubo de alimentação, a fim de zerar o aparelho e prepará-

lo para as próximas leituras. Na parte superior existem as válvulas de escapamento de ar e de abastecimento mais o reservatório de água, usados no reabastecimento do tubo de alimentação do Irrigâmetro.

Durante o reabastecimento, a válvula interconectora permanece fechada, e as de escapamento e de abastecimento ficam abertas. Depois do reabastecimento do tubo de alimentação, fecham-se as válvulas de escapamento e de abastecimento, e abre-se a válvula de drenagem até zerar o aparelho. Em seguida, é restabelecido o seu funcionamento normal, por meio da abertura da válvula interconectora (OLIVEIRA e RAMOS, 2008).

### **3.2. Estimativa da evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) com uso do programa computacional REF-ET**

Para estimativa da  $ET_0$  foi utilizado o programa computacional REF-ET (ALLEN, 2000).

Os elementos meteorológicos horários, necessários para obter a evapotranspiração de referência, foram coletados na estação meteorológica automática localizada na área experimental e constituíram os dados de entrada para o programa computacional.

### **3.3. Coeficiente do Irrigâmetro ( $K_I$ )**

Para determinar o coeficiente do Irrigâmetro de cada altura do nível de água no evaporatório, bem como a influência dos elementos climáticos associados a essas alturas, o experimento foi montado num delineamento inteiramente casualizado com seis tratamentos e três repetições. Os tratamentos consistiram de Irrigâmetros operando com água nos evaporatórios nas seguintes alturas:  $N1 = 1$ ,  $N2 = 2$ ,  $N3 = 3$ ,  $N4 = 4$ ,  $N5 = 5$  e  $N6 = 6$  cm, tomadas a partir de um nível de referência numa, escala ascendente, próprio do aparelho, totalizando 18 Irrigâmetros.

A altura do nível da água no evaporatório que corresponde ao  $K_I$  igual a 1, ou seja, a altura ajustada para a estimativa direta da evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ), foi determinada com o ajustamento de uma equação que relacionava as alturas dos níveis de água no evaporatório e os respectivos coeficientes do Irrigâmetro obtidos nas diferentes alturas avaliadas.



A coleta de dados nos Irrigômetros foi feita diariamente, e os dados armazenados na estação meteorológica automática foram acessados semanalmente.

Em cada tratamento foi determinado um coeficiente médio mensal para o Irrigômetro, denominado  $K_I$ , calculado com a aplicação da equação 4, que estabelece a relação entre a evapotranspiração estimada pelo Irrigômetro ( $ET_I$ ) e a evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ).

$$K_I = \frac{ET_I}{ET_0} \quad (4)$$

### 3.4. Análise estatística e coeficiente de trilha

O desempenho do Irrigômetro na estimativa da evapotranspiração de referência foi analisado comparando-se os resultados obtidos no aparelho com os conseguidos com a equação de Penman-Monteith-FAO 56 (equação 3).

A comparação dos valores foi realizada seguindo-se a metodologia proposta por Allen et al. (1989), a qual se fundamenta no erro-padrão da estimativa (SEE), calculado pela equação:

$$SEE = \left( \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{n} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

em que:

SEE = erro-padrão da estimativa, mm d<sup>-1</sup>;

P<sub>i</sub> = evapotranspiração estimada pelo Irrigômetro, mm d<sup>-1</sup>; e

O<sub>i</sub> = evapotranspiração de referência obtida pelo método-padrão, mm d<sup>-1</sup>; e

n = número de observações.

A metodologia para avaliar o desempenho do Irrigômetro fundamenta-se na determinação das estimativas da evapotranspiração e foi feita com base nos valores do erro-padrão da estimativa (SEE), do coeficiente de determinação ( $r^2$ ) e do coeficiente

angular (b) das respectivas regressões lineares simples. A melhor alternativa foi aquela que apresentou maior  $r^2$ , menor SEE e b próximo da unidade.

O coeficiente de determinação indicou a precisão, ou seja, quanto a regressão explica a soma do quadrado total. A comparação entre a evapotranspiração estimada pelo Irrigâmetro e a estimada pelo método de Penman-Monteith foi realizada com uma adaptação da metodologia descrita por Willmott et al. (1985). A aproximação dos valores obtidos pelo Irrigâmetro e aqueles estimados pela equação foi dada por um índice designado de concordância ou ajuste, representado pela letra “d” (WILLMOTT et al., 1985). Seus valores variam de zero para nenhuma concordância a 1 para a concordância perfeita.

O índice de concordância é dado pela seguinte expressão:

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n [(|P_i - \bar{O}| + |O_i - \bar{O}|)]^2} \quad (6)$$

em que:

d = índice de concordância ou ajuste;

P<sub>i</sub> = evapotranspiração estimada pelo Irrigâmetro, mm d<sup>-1</sup>;

O<sub>i</sub> = evapotranspiração de referência obtida pelo método-padrão, mm d<sup>-1</sup>;

$\bar{O}$  = média dos valores de ET<sub>0</sub> obtidos pelo método-padrão, mm d<sup>-1</sup>; e

n = número de observações.

A determinação dos efeitos das variáveis meteorológicas na evapotranspiração estimada pelo Irrigâmetro foi feita com o aparelho operando com diferentes níveis de água no evaporatório.

Uma fonte de geração de modelos adotada neste estudo foi a análise de trilha (*path analysis*). A técnica de estatística multivariada, como a análise de trilha, possibilita realçar os efeitos diretos e indiretos de um conjunto de variáveis climáticas sobre uma variável principal. Assim, pode-se aplicá-la para verificar a importância de um ou mais elementos meteorológicos na evapotranspiração estimada pelo Irrigâmetro operando nos diferentes níveis de água no evaporatório.

Na Figura 5 está apresentado o diagrama utilizado para a melhor interpretação dos resultados da análise de trilha, que desdobra os coeficientes de Pearson em efeitos diretos e indiretos.

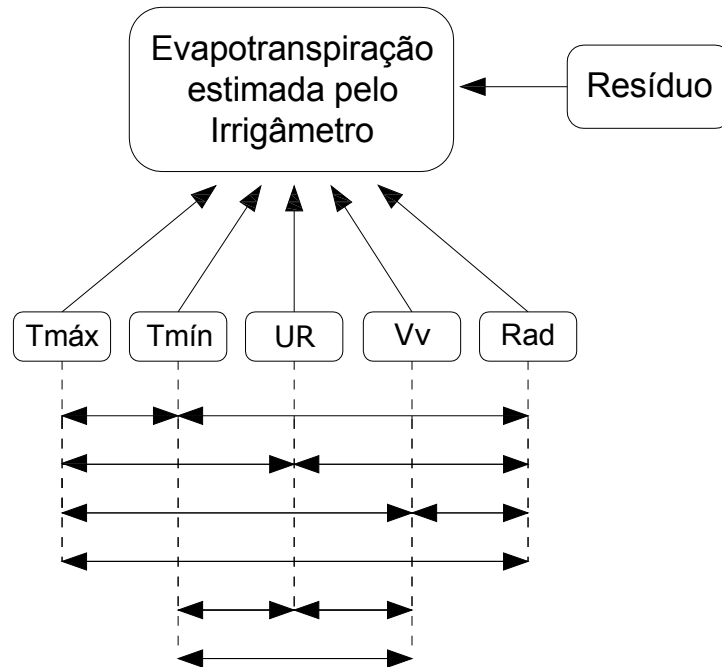


Figura 5 - Diagrama causal indicando a inter-relação das variáveis explicativas: Tmáx = temperatura máxima; Tmín = temperatura mínima; UR = umidade relativa; Vv = velocidade do vento; e Rad = radiação sobre a variável principal, evapotranspiração estimada pelo Irrigâmetro.

Nessa Figura, as setas unidirecionais indicam o efeito direto de uma variável explicativa sobre a principal, enquanto as setas bidirecionais representam a interdependência de duas variáveis explicativas e determinam a trilha representativa do efeito indireto sobre a variável básica.

Foi realizada a avaliação de multicolinearidade a partir das matrizes dos coeficientes de correlação de cada mês, como descrito por Cruz e Regazzi (1997).

As variáveis explicativas foram previamente escolhidas, e fez-se, inicialmente, a análise de correlação linear simples (correlação de Pearson), utilizando o programa estatístico GENES 2007.0.0 (2007), para obter as matrizes de correlação e suas significâncias pelo teste “t”, em níveis de 1 e 5% de probabilidades. Posteriormente foi feita a análise de trilha, com os objetivos de estimar as correlações e analisar a relação entre as variáveis explicativas temperatura máxima, temperatura mínima, umidade relativa, velocidade do vento e

radiação pelos seus desdobramentos em efeitos diretos e indiretos sobre a variável principal, no caso a evapotranspiração estimada pelos Irrigômetros operando com níveis de água N1, N2, N3, N4, N5 e N6, correspondentes aos níveis 1, 2, 3, 4, 5 e 6 cm, respectivamente.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nas Figuras 6, 7 e 8, encontram-se as variações diárias dos valores dos elementos meteorológicos utilizados na estimativa da evapotranspiração de referência, obtidos durante o período experimental.

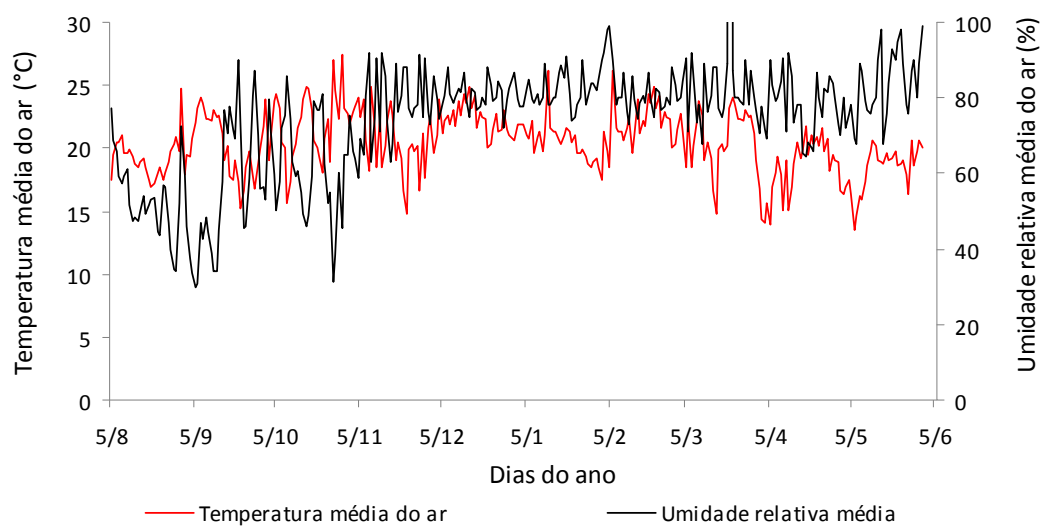


Figura 6 - Variação diária da temperatura média e da umidade relativa média do ar durante o período experimental.

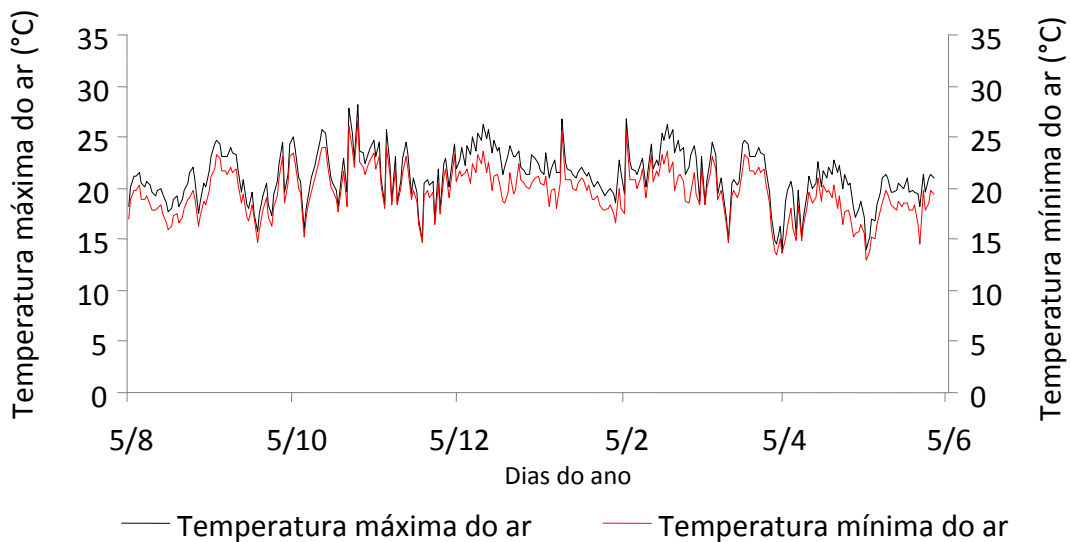


Figura 7 - Variação diária da temperatura máxima e da temperatura mínima do ar durante o período experimental.

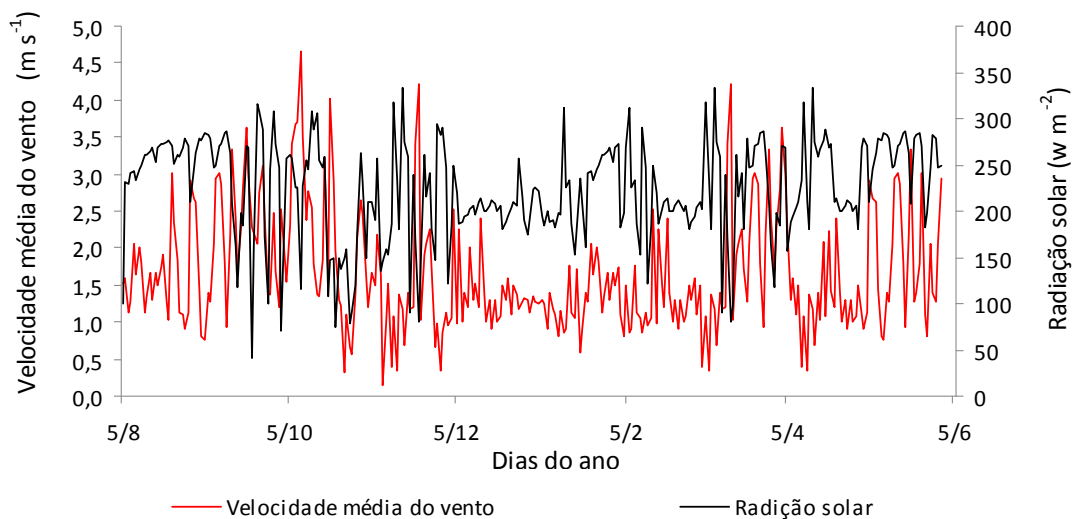


Figura 8 - Variação diária da velocidade média do vento e da radiação solar ao longo do período experimental.

A evaporação da água é dependente da quantidade de energia (radiação), da temperatura do ar, do déficit de pressão parcial de vapor sobre a superfície evaporante e da velocidade do vento. Durante o período experimental, observou-se grande amplitude dos valores de umidade relativa do ar. Observa-se, na Figura 6, que a umidade relativa média diária foi, em grande parte do período experimental, superior a 70%, classificada como alta, com a ocorrência de valores extremos, sendo 29,7% e 100% os valores

mínimo e máximo, respectivamente. Valores próximos de 100% foram observados nos últimos meses do experimento ocorrendo maior incidência de condensação e escoamento de orvalho nas paredes internas do evaporatório, sendo necessário, então, realizar a retirada do excesso de água do seu interior.

Observa-se, na Figura 6, que a temperatura média do ar em todo o período experimental ficou em torno de 21 °C, sendo verificados valores máximo e mínimo de 27,4 °C e 14,8 °C, respectivamente. Na Figura 7, constata-se que as temperaturas máxima e mínima do ar variaram em torno de 23 °C e 19 °C, respectivamente. Nota-se, ainda pequena amplitude entre as temperaturas máxima e mínima do ar.

Observa-se, na Figura 8, que, em geral, a velocidade média do vento no período experimental foi inferior a 2 m s<sup>-1</sup>, considerada leve, de acordo com Doorenbos e Pruitt (1977). A radiação média diária do período em estudo foi de 223,6 W m<sup>-2</sup>, equivalente a 19,32 MJ m<sup>-2</sup> d<sup>-1</sup>.

Na Tabela 1, encontra-se o resumo da análise de variância dos dados de evapotranspiração estimada pelo Irrigâmetro nos diferentes níveis de água dentro do evaporatório.

Tabela 1 - Resumo da análise de variância dos níveis de água dentro do evaporatório

Fonte de Variação	GL	QM
Níveis da água	5	2,0114**
Resíduo	12	0,0751
Coeficiente de variação (%)		4,89

\*\* Significativo a 1% de probabilidade, pelo teste F.

A evapotranspiração estimada pelo Irrigâmetro foi significativamente afetada pelo aumento do nível de água dentro do evaporatório.

Na Tabela 2, encontram-se os coeficientes do Irrigâmetro ( $K_1$ ), erro-padrão da estimativa (SEE), índice de concordância de Willmott (d), coeficiente de determinação ( $r^2$ ), coeficiente angular (b) e evapotranspiração estimada pelo Irrigâmetro obtidos dos valores de evapotranspiração estimados pelo Irrigâmetro em cada nível de água no evaporatório. Para as determinações do  $K_1$  das Tabelas 2, 4, 5 e 6, utilizou-se a média de evapotranspiração de referência de todo o período experimental de valor igual a 4,41 mm d<sup>-1</sup>.

Tabela 2 - Valores médios do coeficiente do Irrigâmetro ( $K_I$ ) para  $ET_0$  média de 4,41  $mm.d^{-1}$ , erro-padrão da estimativa (SEE), índice de concordância de Willmott (d), coeficiente de determinação ( $r^2$ ), coeficiente angular (b) e valores de  $ET_I$  e  $ET_0$ , em intervalos diários

Nível (cm)	$K_I$	SEE	d	$r^2$	b	$ET_I$ ( $mm d^{-1}$ )
1	0,52	2,35	0,47	0,29	0,39	2,29
2	0,62	1,98	0,52	0,25	0,43	2,74
3	0,77	1,24	0,74	0,64	0,75	3,41
4	0,87	0,79	0,87	0,75	0,80	3,86
5	1,24	1,37	0,72	0,53	0,83	5,48
6	1,39	2,01	0,61	0,53	1,01	6,14

Na Tabela 2, observa-se que a evapotranspiração estimada pelo Irrigâmetro aumentou com a elevação do nível de água dentro do evaporatório. À medida que aumentou o nível de água dentro do evaporatório, houve ampliação da área exposta e da superfície da água livre à atmosfera e, conseqüentemente, maior interceptação da radiação solar, variável que exerce grande influência no processo da evaporação (CHANG, 1971), ao mesmo tempo que favorece a ação do vento, atuando na remoção do ar saturado sobre a superfície evaporante e acarretando maiores valores de evaporação. No entanto, quando o nível da água permaneceu mais distante da borda do evaporatório ocorreram diminuição da área exposta à atmosfera e maior sombreamento da água no seu interior, provavelmente diminuindo o efeito da radiação e da velocidade do vento. Resultados como esses foram encontrados por Tagliaferre (2006), em estudos envolvendo os minievaporímetros UFV-1 e UFV-2 operando com Irrigâmetro modificado.

No período avaliado, o menor erro-padrão da estimativa e o maior índice de concordância foram obtidos com o Irrigâmetro operando com água no evaporatório no nível de 4 cm, indicando melhor desempenho para a estimativa da  $ET_0$ , diante dos demais níveis estudados. Assim, o Irrigâmetro operando com o evaporatório no nível N4 foi o que apresentou resultados mais próximos da  $ET_0$  estimada pelo método padrão, para intervalos diários.

Observa-se, na Figura 9, a comparação entre a evapotranspiração de referência e a evapotranspiração estimada pelo Irrigâmetro operando com o nível de água no evaporatório em 4 cm. Percebe-se, nessa Figura, comportamento semelhante entre os dois métodos, em que o Irrigâmetro operando no nível 4 cm superestimou o valor médio



da evapotranspiração de referência em 3,2%, quando se compararam as médias totais de todo o período experimental.

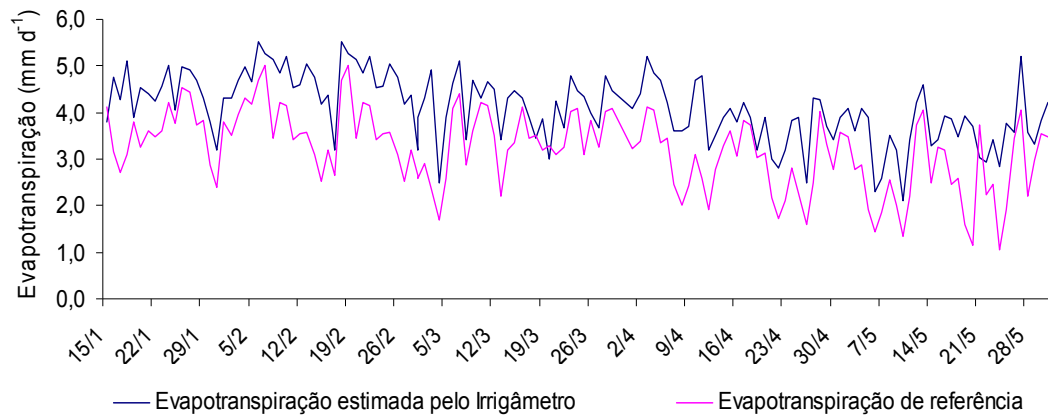


Figura 9 - Comparação entre a evapotranspiração de referência estimada pelo método padrão e a evapotranspiração estimada pelo Irrigâmetro, em mm d<sup>-1</sup>, operando com o nível de água no evaporatório em 4 cm, no período de janeiro a maio de 2009.

Na Figura 10 estão apresentados os valores do coeficiente do Irrigâmetro em função dos diferentes níveis de água no interior do evaporatório em todo o período experimental.

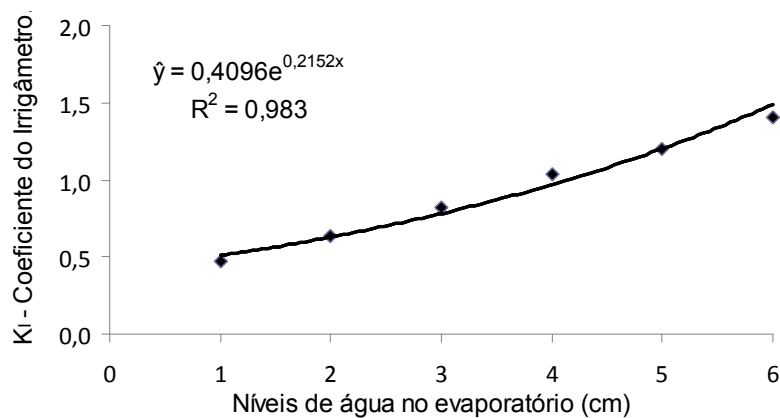


Figura 10 - Relação entre o coeficiente do Irrigâmetro e os níveis de água dentro do evaporatório em todo o período experimental.

De acordo com a equação de regressão ajustada, a análise dos dados em todo o período experimental mostra que, para estimar a evapotranspiração de referência com o uso do Irrigâmetro na região do Alto Paranaíba, MG, recomenda-se operar o aparelho com o nível de água no evaporatório igual a 4,1 cm. Em estudo realizado na região de Viçosa, MG, Caixeta (2009) obteve uma equação de regressão semelhante, em que para estimar a evapotranspiração de referência com o uso do Irrigâmetro, deve-se operar o aparelho com o nível de água no evaporatório igual a 2,4 cm. Paula (2009), na região do Jaíba, MG, concluiu que, para estimar a evapotranspiração de referência com o uso do Irrigâmetro, recomenda-se operar o aparelho com o nível de água no evaporatório igual a 3,9 cm.

Nas Figuras 11 a 20, apresentam-se os valores do coeficiente do Irrigâmetro em função dos diferentes níveis de água dentro do evaporatório de cada mês do período experimental.

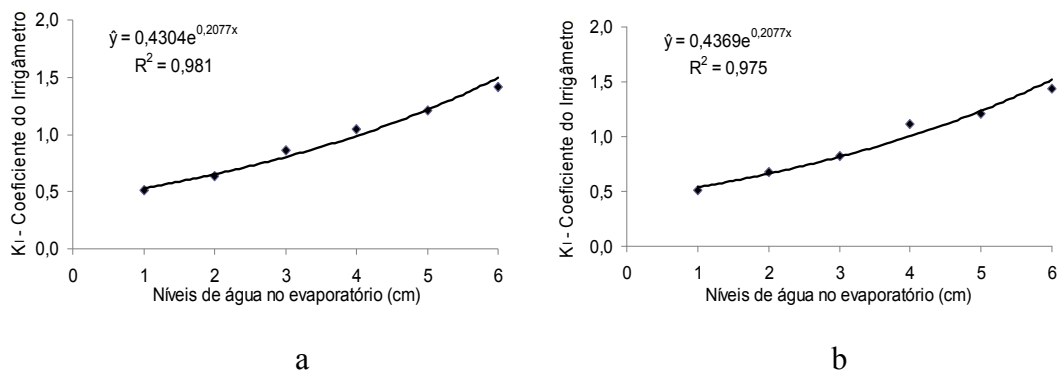


Figura 11 - Relação entre o coeficiente do Irrigâmetro e os níveis de água dentro do evaporatório nos meses de agosto (a) e setembro (b).

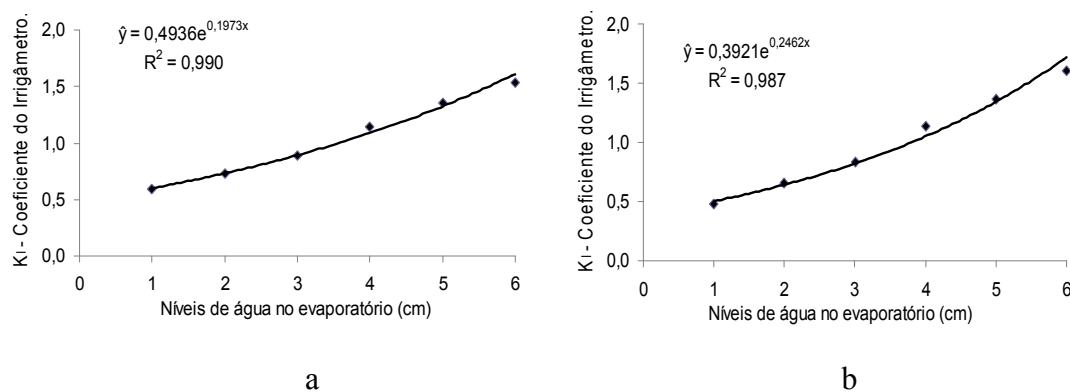


Figura 12 - Relação entre o coeficiente do Irrigâmetro e os níveis de água dentro do evaporatório nos meses de outubro (a) e novembro (b).

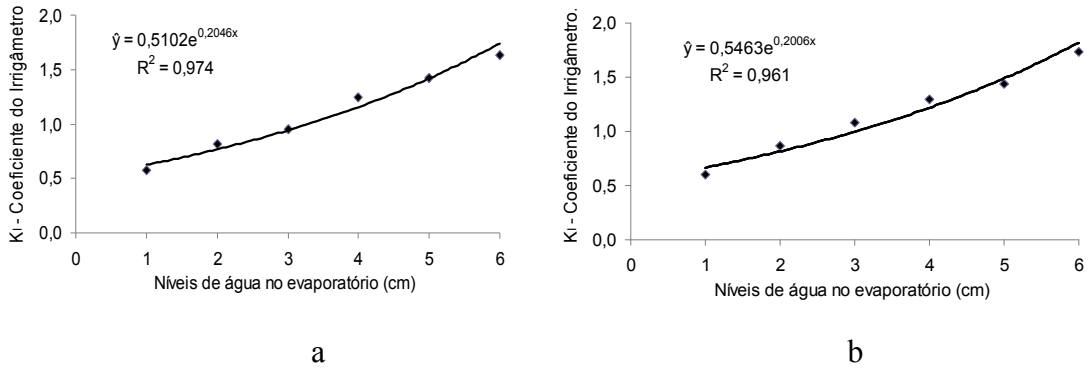


Figura 13 - Relação entre o coeficiente do Irrigâmetro e os níveis de água dentro do evaporatório nos meses de dezembro (a) e janeiro (b).

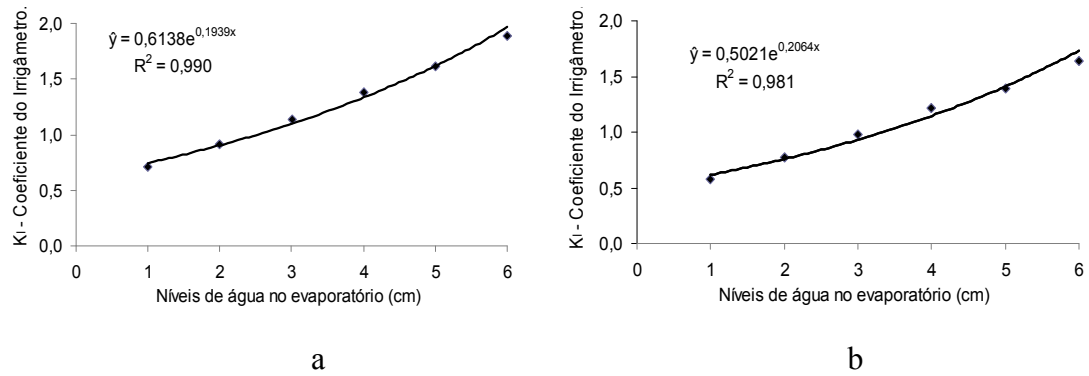


Figura 14 - Relação entre o coeficiente do Irrigâmetro e os níveis de água dentro do evaporatório nos meses de fevereiro (a) e março (b).

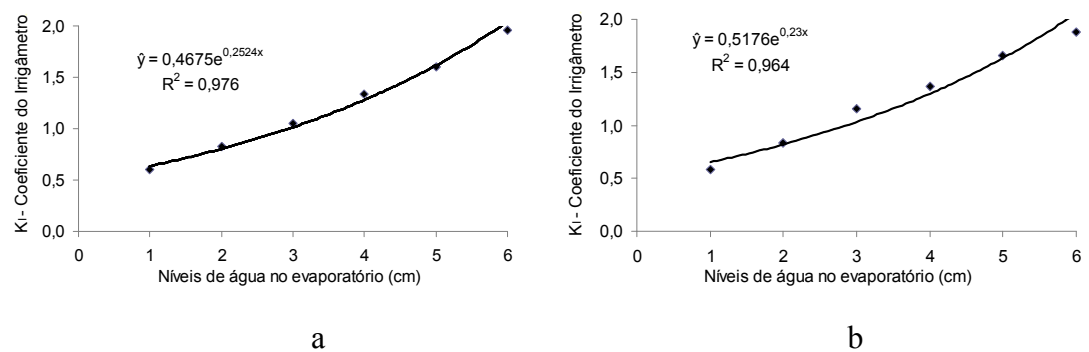


Figura 15 - Relação entre o coeficiente do Irrigâmetro e os níveis de água dentro do evaporatório nos meses de abril (a) e maio (b).

Observa-se, nas Figuras 11 a 15, que os valores dos coeficientes do Irrigâmetro aumentaram exponencialmente com o nível da água dentro do evaporatório em todos os

meses estudados. O bom ajuste do modelo exponencial aos dados obtidos indica que a equação de regressão pode ser utilizada para determinar os níveis de água no evaporatório do Irrigâmetro para obter diretamente a evapotranspiração de referência ou da cultura em qualquer estágio de desenvolvimento, uma vez que, para cada  $K_c$ , tem-se um  $K_I$  correspondente.

Para estimar a evapotranspiração de referência com o uso do Irrigâmetro na região do Alto Paranaíba, MG, nos meses de agosto a maio, recomenda-se operar o aparelho com o nível de água no evaporatório correspondente ao  $K_I$  igual a 1, nas alturas apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Valores mensais dos níveis de água no evaporatório do Irrigâmetro estimados para determinar a evapotranspiração de referência correspondente ao  $K_I$  igual a 1

Meses	Ago.	Set.	Out.	Nov.	Dez.	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.
Nível (cm)	4,1	4,0	3,6	3,8	3,3	3,0	2,5	3,3	3,0	2,9

Na Tabela 3, percebem-se menores valores recomendados dos níveis de água no evaporatório nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro. Uma explicação para isso pode ser o início do período de chuvas, bem como o consequente aumento da nebulosidade e da umidade relativa do ar na região, contribuindo para a diminuição da evaporação. Os valores menores nos meses de abril e maio foram em decorrência da queda da temperatura média nesse período. Em estudo realizado na região de Viçosa, MG, Oliveira et al. (2007) descreveram a tendência de diminuir o nível de água no evaporatório para estimar a evapotranspiração de referência, com o decréscimo da temperatura média.

Na Figura 21, encontram-se os valores diários de evapotranspiração estimados pelo Irrigâmetro operando em diferentes níveis de água no evaporatório, em comparação com o método de Penman-Monteith-FAO 56, com as equações de regressão e com os respectivos valores do coeficiente de determinação.

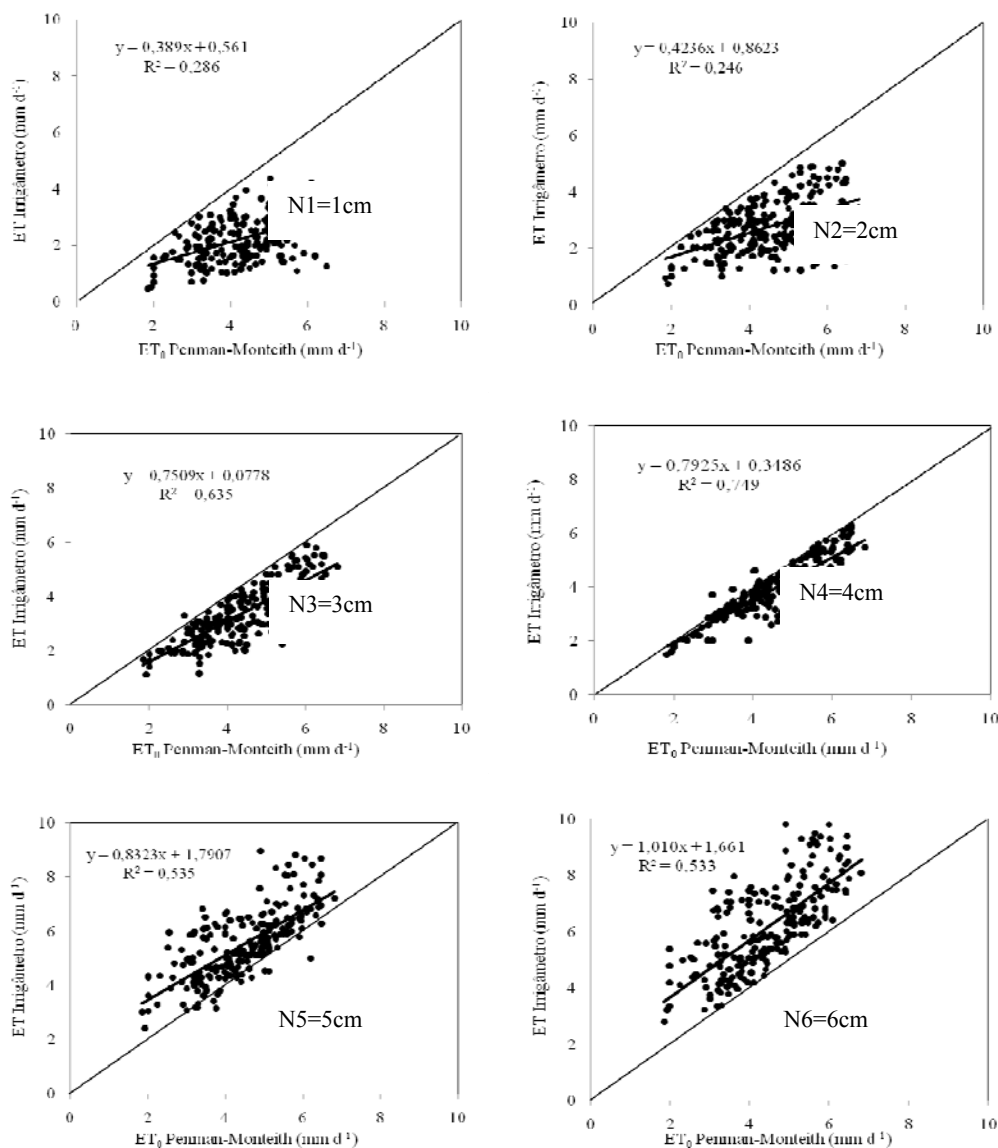


Figura 21 - Comparação entre a evapotranspiração estimada com o uso do Irrigâmetro em diversos níveis de água do evaporatório e os valores de ET<sub>0</sub> obtidos pelo método de Penman-Monteith-FAO 56, em intervalos diários.

Na Figura 21, observa-se que o Irrigâmetro subestimou a evapotranspiração de referência operando com níveis de água nos evaporatórios em 1, 2, 3 e 4 cm e a superestimou nos níveis 5 e 6 cm. De acordo com a Figura 21, o nível de água no evaporatório em 4 cm (N4) foi o que melhor se ajustou para a estimativa da evapotranspiração de referência, considerando o método de Penman-Monteith-FAO 56 como padrão.

Com os resultados do Irrigâmetro operando com o nível de água em 6 cm, obteve-se uma linha de tendência que praticamente acompanha a linha de valores 1:1, ou seja, com a inclinação mais semelhante; contudo, são valores superestimados de evapotranspiração de referência.

Valores de  $K_I$  subestimados ( $K_I < 1$ ) e superestimados ( $K_I > 1$ ) têm sido usados para estimar diretamente a evapotranspiração da cultura utilizando o aparelho, com correspondência para valores de  $K_c$  menores e maiores que a unidade, respectivamente.

As comparações dos níveis de água no evaporatório nos períodos de três, cinco e sete dias seguiram a mesma metodologia estatística aplicada na escala diária, sendo apresentadas nas Tabelas 4, 5 e 6, respectivamente.

Tabela 4 - Valores médios do coeficiente do Irrigâmetro ( $K_I$ ) para  $ET_0$  média de 4,41  $\text{mm.d}^{-1}$ , erro-padrão da estimativa (SEE), índice de concordância de Willmott (d), coeficiente de determinação ( $r^2$ ), coeficiente angular (b) e valores de  $ET_I$ , em intervalos de três dias

Nível (cm)	$K_I$	SEE	d	$r^2$	b	$ET_I$ ( $\text{mm d}^{-1}$ )
1	0,52	2,27	0,42	0,28	0,38	2,30
2	0,62	1,88	0,47	0,23	0,40	2,76
3	0,77	1,11	0,72	0,76	0,84	3,41
4	0,87	0,70	0,85	0,79	0,79	3,87
5	1,24	1,26	0,68	0,54	0,80	5,48
6	1,39	1,90	0,57	0,59	1,07	6,15

Tabela 5 - Valores médios do coeficiente do Irrigâmetro ( $K_I$ ) para  $ET_0$  média de 4,41  $\text{mm.d}^{-1}$ , erro-padrão da estimativa (SEE), índice de concordância de Willmott (d), coeficiente de determinação ( $r^2$ ), coeficiente angular (b) e valores de  $ET_I$  e  $ET_0$ , em intervalos de cinco dias

Nível (cm)	$K_I$	SEE	d	$r^2$	b	$ET_I$ ( $\text{mm d}^{-1}$ )
1	0,52	2,27	0,39	0,28	0,38	2,29
2	0,62	1,87	0,44	0,23	0,40	2,74
3	0,77	1,12	0,68	0,75	0,86	3,40
4	0,87	0,70	0,81	0,75	0,76	3,86
5	1,24	1,23	0,64	0,49	0,72	5,48
6	1,39	1,86	0,53	0,57	1,00	6,14

Tabela 6 - Valores médios do coeficiente do Irrigâmetro ( $K_I$ ) para  $ET_0$  média de 4,41  $\text{mm.d}^{-1}$ , erro-padrão da estimativa (SEE), índice de concordância de Willmott (d), coeficiente de determinação ( $r^2$ ), coeficiente angular (b) e valores de  $ET_1$  e  $ET_0$ , em intervalos de sete dias

Nível (cm)	$K_I$	SEE	d	$r^2$	b	$ET_1$ ( $\text{mm d}^{-1}$ )
1	0,52	2,26	0,35	0,20	0,33	2,29
2	0,62	1,82	0,40	0,22	0,41	2,75
3	0,77	1,08	0,65	0,79	0,90	3,41
4	0,87	0,66	0,80	0,76	0,80	3,86
5	1,24	1,22	0,56	0,41	0,65	5,47
6	1,39	1,85	0,47	0,55	1,01	6,13

Nas Tabelas 4, 5 e 6, observa-se que o agrupamento da evapotranspiração em intervalos de três, cinco e sete dias, respectivamente, não resultou em aumento do coeficiente de determinação. No entanto, apresentou leve redução do índice de concordância e, principalmente, do erro-padrão da estimativa, na maioria das profundidades estudadas, comparativamente ao intervalo de tempo diário.

Nos agrupamentos de três, cinco e sete dias, o Irrigâmetro operando com os níveis de água nos evaporatórios 3 e 4 cm apresentou menor erro-padrão da estimativa e maior índice de concordância, indicando melhor desempenho para a estimativa da  $ET_0$  diante dos demais níveis estudados.

De acordo com as Tabelas 2, 4, 5 e 6, os valores de  $K_I$  permanecem constantes, ou seja, não se alteram independentemente do período de comparação.

Nas Figuras 22, 23 e 24, apresentam-se os dados de evapotranspiração estimados pelo Irrigâmetro operando em diferentes níveis de água no evaporatório, em comparação com o método de Penman-Monteith-FAO 56, com as equações de regressão e com os valores do coeficiente de determinação, em intervalos de três, cinco e sete dias, respectivamente.

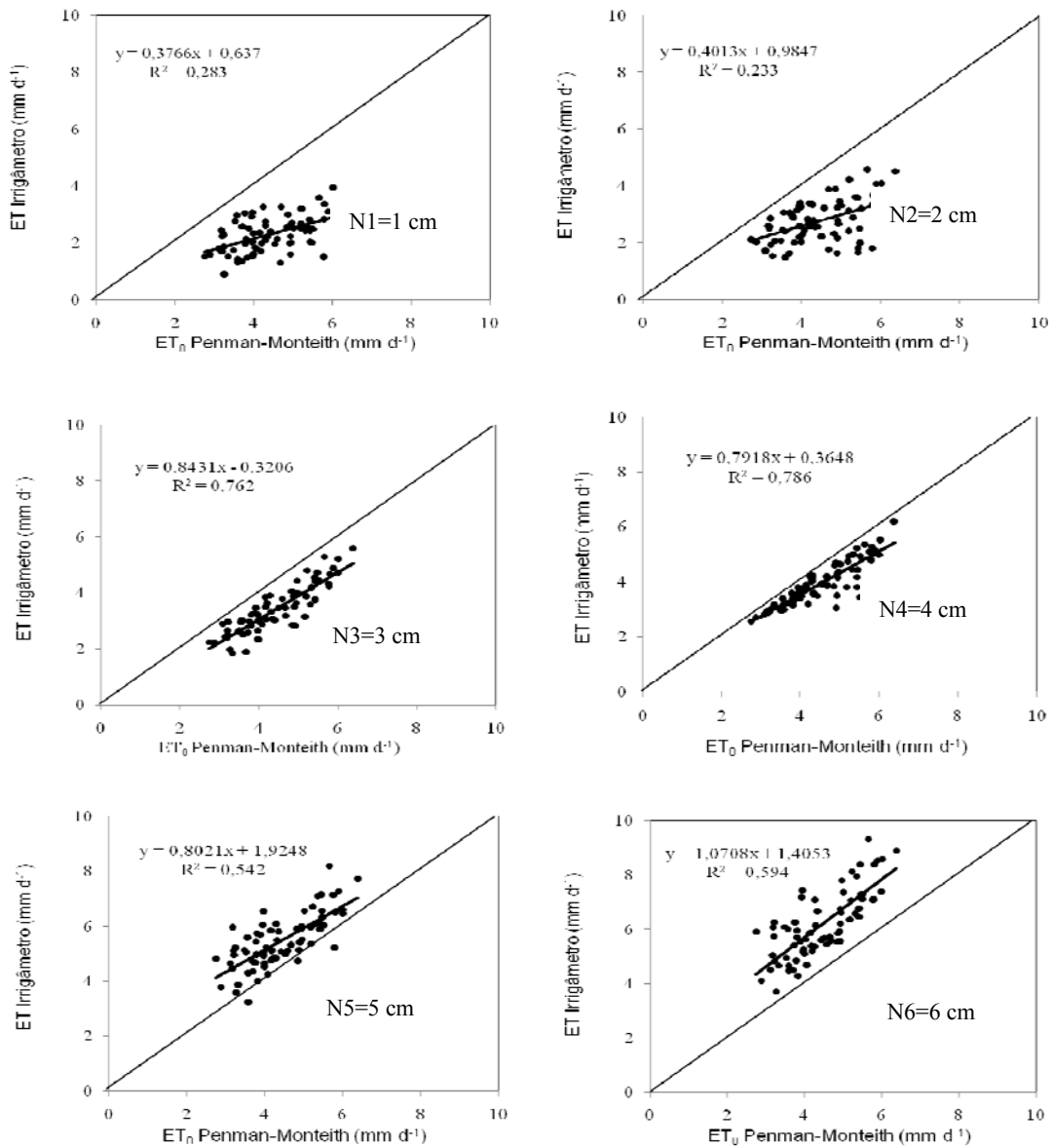


Figura 22 - Comparação entre a evapotranspiração estimada com o uso do Irrigâmetro nos diversos níveis de água no evaporatório e os valores de ET<sub>0</sub> obtidos pelo método de Penmam-Monteith-FAO 56, em intervalos de três dias.



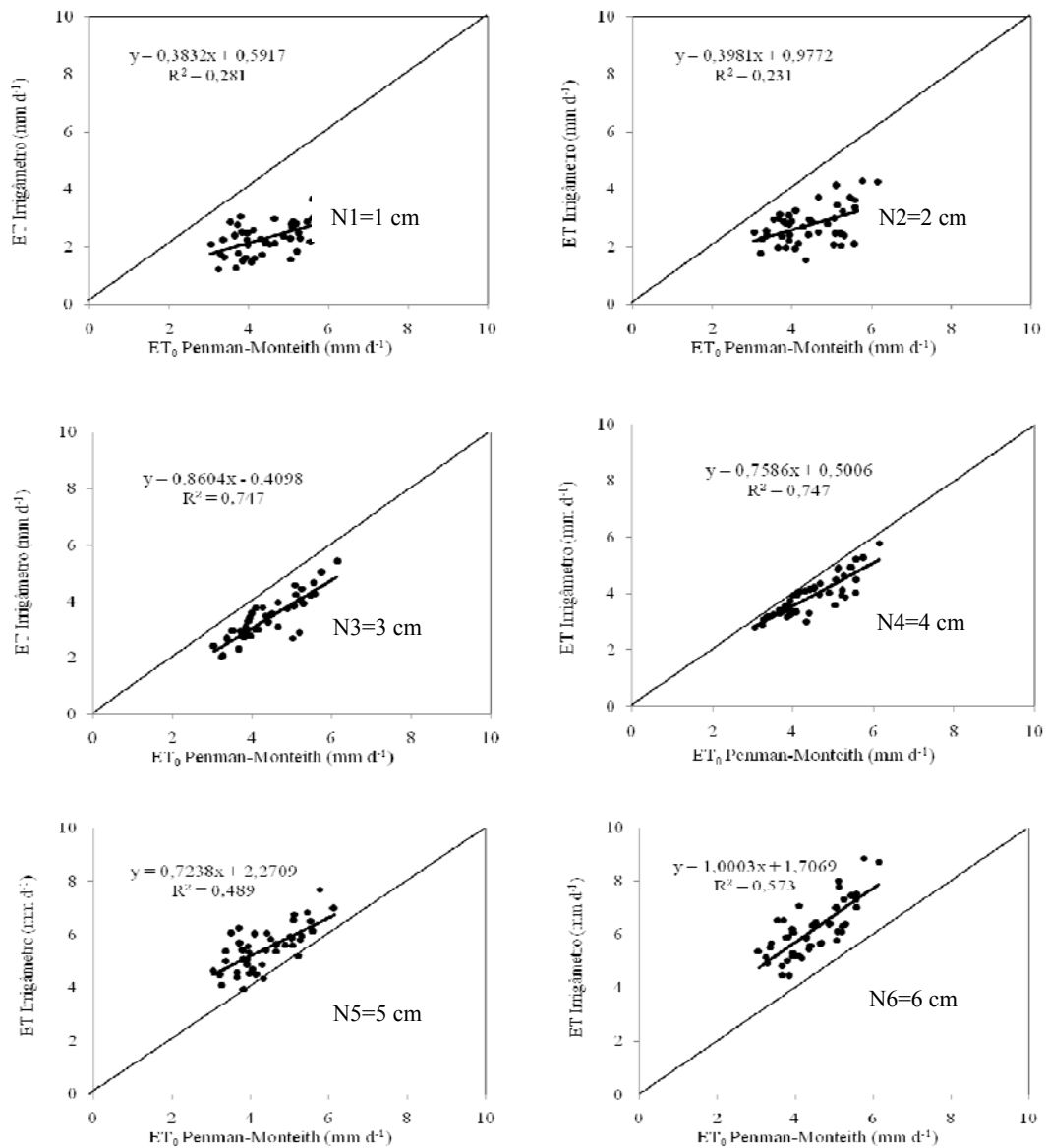


Figura 23 - Comparação entre a evapotranspiração estimada com o uso do Irrigâmetro nos diversos níveis de água no evaporatório e os valores de ET₀ obtidos pelo método de Penman-Monteith-FAO 56, em intervalos de cinco dias.

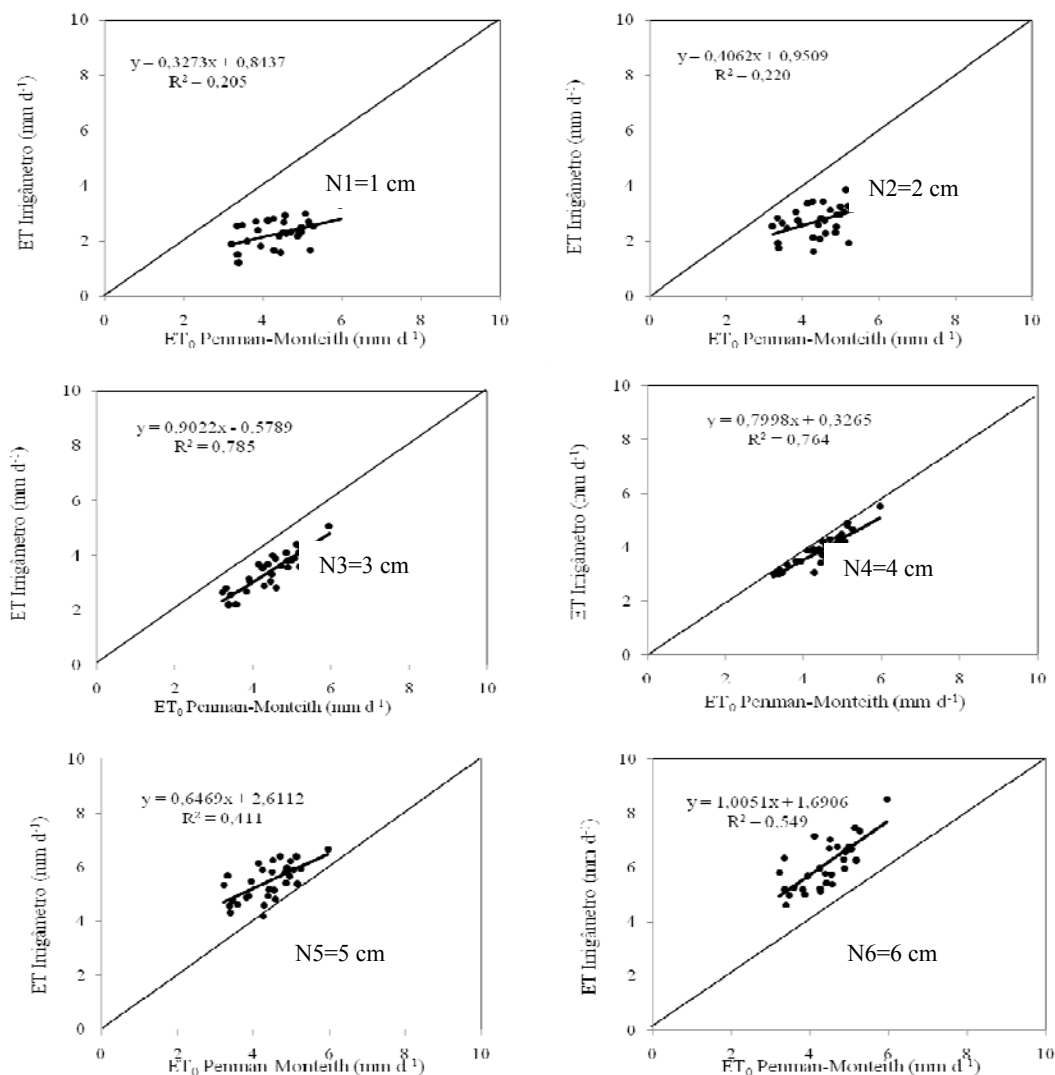


Figura 24 - Comparação entre a evapotranspiração estimada com o uso do Irrigâmetro nos diversos níveis de água no evaporatório e os valores de ET<sub>0</sub> obtidos pelo método de Penman-Monteith-FAO 56, em intervalos de sete dias.

A análise das Figuras 22, 23 e 24 indica que o agrupamento dos valores em períodos maiores não representou melhoria significativa na estimativa da ET<sub>0</sub>. Contudo, observa-se que o Irrigâmetro operando com níveis de água N5 e N6, assim como em intervalos diários, superestima a evapotranspiração, enquanto nos níveis N1, N2, N3 e N4 subestima a evapotranspiração obtida pelo método de Penman-Monteith-FAO 56.

Nos intervalos de tempo analisados, o Irrigâmetro operando com nível de água no evaporatório N4 apresentou valores médios de evapotranspiração bem próximos aos

valores calculados pelo método de Penman-Monteith-FAO 56, apresentando um bom ajuste.

Nas Tabelas 7 e 8 estão apresentados os valores dos coeficientes de correlação de Pearson entre as variáveis explicativas para a evapotranspiração estimada pelo Irrigâmetro, mensalmente, no período experimental.

Antes de submeter as matrizes dos coeficientes de correlação, avaliou-se a multicolinearidade, não sendo encontrados níveis severos nem moderados em nenhuma variável, para todos os meses do experimento.

Em seguida, os coeficientes de correlação foram desdobrados em efeitos diretos e indiretos, para avaliar o efeito das variáveis explicativas sobre a variável principal, através do método da análise de trilha.

Tabela 7 - Estimativa dos coeficientes de correlação de Pearson entre as variáveis explicativas para a evapotranspiração estimada pelo Irrigâmetro nos meses de agosto a dezembro

	T mín	UR	Vv	Rad
Agosto				
T máx	0,9662**	-0,3616ns	-0,3091 ns	0,0876ns
T mín		-0,1523ns	-0,2327ns	-0,0619 ns
UR			0,2935 ns	0,6959**
Vv				-0,1478 ns
Setembro				
T máx	0,9916**	-0,7437**	-0,1138 ns	0,4297*
T mín		0,6714**	0,0550ns	0,3516 ns
UR			0,2952 ns	-0,7490**
Vv				0,0238 ns
Outubro				
T máx	0,9972**	-0,8844**	-0,5357**	0,6024**
T mín		-0,8542**	-0,5270**	0,5965**
UR			0,6524**	-0,5017**
Vv				0,0434 ns
Novembro				
T máx	0,9964**	-0,9232**	0,0144 ns	0,4726**
T mín		-0,9072**	-0,0145ns	0,4410*
UR			-0,1584 ns	-0,4020*
Vv				-0,3703ns
Dezembro				
T máx	0,8178**	-0,1647ns	0,3713ns	0,5768*
T mín		-0,4976ns	0,5144ns	0,7575**
UR			-0,3569 ns	-0,7832**
Vv				0,3526 ns

ns Não significativo a 5% pelo teste t; \* Significativo a 5%, pelo teste t; e \*\* Significativo a 1%, pelo teste t.

Tabela 8 - Estimativa dos coeficientes de correlação de Pearson entre as variáveis explicativas para a evapotranspiração estimada pelo Irrigâmetro nos meses de janeiro a maio

	T mín	UR	Vv	Rad
Janeiro				
T máx	0,9773**	0,7911**	-0,3738 ns	0,6016**
T mín		0,8393**	-0,3054ns	-0,6687**
UR			-0,4146 ns	-0,8522**
Vv				0,2501 ns
Fevereiro				
T máx	0,9491**	0,2559ns	-0,0197 ns	0,2012ns
T mín		0,2678ns	0,0612ns	0,1856 ns
UR			-0,1887 ns	-0,7489**
Vv				0,1338 ns
Março				
T máx	0,9295**	-0,6780**	-0,0374 ns	0,7102**
T mín		-0,7337**	-0,0183ns	0,7649**
UR			-0,2759 ns	-0,6084**
Vv				-0,1728 ns
Abril				
T máx	0,9100**	-0,3623*	-0,3378 ns	0,1848ns
T mín		0,4941**	0,3092ns	0,3870*
UR			-0,2595 ns	-0,6976**
Vv				0,0036 ns
Maio				
T máx	0,9575**	-0,4162*	0,0642 ns	0,1162ns
T mín		-0,4862**	0,2553ns	0,2115 ns
UR			0,1636 ns	-0,8291**
Vv				-0,2080 ns

ns Não significativo a 5% pelo teste t; \* Significativo a 5%, pelo teste t; e \*\* Significativo a 1%, pelo teste t.

Observa-se, nas Tabelas 7 e 8, que os elementos meteorológicos temperatura máxima, temperatura mínima, umidade relativa e radiação apresentaram correlação significativa entre si, nos meses de outubro, janeiro e março. A umidade relativa apresentou correlação significativa com as temperaturas máxima e mínima no período experimental, exceto agosto, dezembro e fevereiro. Observou-s, também, que a variável velocidade do vento não apresentou correlação com as demais, exceto no mês de

outubro. Percebeu-se que, no período experimental, a variável umidade relativa e a radiação tiveram correlação significativa pelo teste t, em todos os meses da pesquisa.

Desdobraram-se, por meio da análise de trilha, as correlações de cada variável independente, ou seja, os elementos climatológicos temperatura máxima ( $T_{máx}$ ), temperatura mínima ( $T_{mín}$ ), umidade relativa (UR), velocidade do vento (Vv) e radiação (Rad), com a variável dependente evapotranspiração estimada pelo Irrigâmetro, no período diário, em seus efeitos diretos e indiretos, para verificar a influência de cada elemento climatológico sobre essa evapotranspiração.

Os resultados da análise de trilha de cada mês encontram-se nas Tabelas 9, 10 e Tabelas 1A a 10A (Apêndice), em que são descritos os efeitos diretos e indiretos das variáveis climatológicas sobre a evapotranspiração estimada pelo Irrigâmetro, correspondente a cada nível de água no evaporatório.

Tabela 9 - Estimativa da correlação total entre a variável evapotranspiração obtida no Irrigâmetro e as variáveis temperatura máxima, temperatura mínima, umidade relativa, velocidade do vento e radiação nos meses de agosto a dezembro

<b>Correlação Total (Pearson) Agosto</b>						
Nível (cm)	1	2	3	4	5	6
T. máxima	0,1379ns	0,0583ns	-0,1153ns	-0,1083ns	0,0499ns	-0,0069ns
T. mínima	0,0518ns	-0,0410ns	-0,2070ns	-0,1763ns	-0,0665ns	-0,1254ns
UR	<b>-0,4841**</b>	<b>-0,5067**</b>	-0,3606ns	-0,3565ns	<b>-0,5665**</b>	<b>-0,5580**</b>
Vv	-0,2028ns	-0,0549ns	-0,1165ns	0,1120ns	0,0668ns	0,1548ns
Radiação	0,1479ns	0,1370ns	0,1897ns	0,2035ns	0,2239ns	0,2504ns
<b>Correlação Total (Pearson) Setembro</b>						
T. máxima	<b>0,8036**</b>	<b>0,8076**</b>	<b>0,8134**</b>	<b>0,6650**</b>	<b>0,7839**</b>	<b>0,6717**</b>
T. mínima	<b>0,7793**</b>	<b>0,7984**</b>	<b>0,7942**</b>	<b>0,6475**</b>	<b>0,7647**</b>	<b>0,6408**</b>
UR	<b>-0,8093**</b>	<b>-0,7420**</b>	<b>-0,7967**</b>	<b>-0,7104**</b>	<b>-0,7626**</b>	<b>-0,7569**</b>
Vv	-0,0115ns	0,0203ns	-0,0704ns	0,0992ns	-0,0004ns	-0,0586ns
Radiação	<b>0,6054**</b>	<b>0,4873**</b>	<b>0,574**</b>	<b>0,6190**</b>	<b>0,5285**</b>	<b>0,5319**</b>
<b>Correlação Total (Pearson) Outubro</b>						
T. máxima	<b>0,5770**</b>	<b>0,5813**</b>	<b>0,6123**</b>	<b>0,5748**</b>	<b>-0,5437**</b>	<b>0,5748**</b>
T. mínima	<b>0,5417**</b>	<b>0,5459**</b>	<b>0,5832**</b>	<b>0,5431**</b>	<b>0,4998**</b>	<b>0,5315**</b>
UR	<b>-0,7119**</b>	<b>-0,7229**</b>	<b>-0,7210**</b>	<b>-0,6651**</b>	<b>-0,6654**</b>	<b>-0,7428**</b>
Vv	-0,3633ns	-0,3862ns	-0,3481ns	-0,3184ns	-0,2078ns	-0,4073ns
Radiação	0,1270ns	0,1323ns	0,2113ns	0,4148ns	<b>0,5400**</b>	<b>0,5271**</b>
<b>Correlação Total (Pearson) Novembro</b>						
T. máxima	0,2014ns	0,1773ns	0,2013ns	-0,0889ns	0,1883ns	0,2161ns
T. mínima	0,2080ns	0,1836ns	0,2064ns	-0,0915ns	0,1889ns	0,2045ns
UR	-0,2631ns	-0,0255ns	-0,2867ns	-0,0481ns	-0,2895ns	-0,3548ns
Vv	0,2011ns	0,2082ns	0,2787ns	0,3077ns	0,3513ns	0,4584ns
Radiação	-0,2028ns	-0,2579ns	-0,2826ns	-0,4214ns	-0,3164ns	-0,1914ns
<b>Correlação Total (Pearson) Dezembro</b>						
T. máxima	-0,2164ns	-0,1136ns	-0,3034ns	-0,0759ns	-0,1715ns	-0,2034ns
T. mínima	-0,2065ns	-0,1276ns	-0,3951ns	-0,2235ns	-0,3255ns	-0,4009ns
UR	0,0909ns	-0,0464ns	0,1508ns	0,1617ns	0,4430ns	0,3538ns
Vv	-0,0625ns	0,0504ns	-0,2928ns	0,4017ns	0,3570ns	0,3447ns
Radiação	-0,0158ns	0,0486ns	-0,1724ns	-0,2057ns	<b>-0,4828**</b>	-0,3722ns

Tabela 10 - Estimativa da correlação total entre a variável evapotranspiração obtida no Irrigâmetro e as variáveis temperatura máxima, temperatura mínima, umidade relativa, velocidade do vento e radiação nos meses de janeiro a maio

<b>Correlação Total (Pearson) Janeiro</b>						
Nível (cm)	1	2	3	4	5	6
T. máxima	<b>-0,5974**</b>	<b>-0,7247**</b>	-0,1241ns	-0,1001ns	0,2078ns	0,3477ns
T. mínima	<b>-0,6479**</b>	<b>-0,7689**</b>	-0,1371ns	-0,1929ns	0,1107ns	0,2508ns
UR	<b>-0,7877**</b>	<b>-0,8377**</b>	-0,1875ns	-0,1506ns	-0,0097ns	0,1442ns
Vv	0,2262ns	0,3270ns	0,0176ns	-0,2385ns	-0,0134ns	-0,0704ns
Radiação	<b>0,5736**</b>	<b>0,5827**</b>	0,0396ns	0,0452ns	-0,0440ns	-0,2052ns
<b>Correlação Total (Pearson) Fevereiro</b>						
T. máxima	-0,1532ns	-0,1209ns	-0,1274ns	-0,0752ns	-0,1613ns	-0,1836ns
T. mínima	-0,2445ns	-0,2356ns	-0,2450ns	-0,2538ns	-0,3367ns	-0,3221ns
UR	0,0676ns	0,0403ns	0,0124ns	-0,1550ns	-0,2247ns	-0,1075ns
Vv	-0,3877ns	-0,2998ns	-0,2960ns	-0,2376ns	-0,3531ns	-0,4484ns
Radiação	-0,2945ns	-0,2564ns	-0,2199ns	-0,0466ns	-0,0077ns	-0,1306ns
<b>Correlação Total (Pearson) Março</b>						
T. máxima	0,2112ns	0,1660ns	0,0910ns	-0,0249ns	-0,1047ns	-0,1438ns
T. mínima	0,2689ns	0,2488ns	0,0870ns	-0,1110ns	-0,1660ns	-0,1342ns
UR	-0,3179ns	0,0117ns	-0,1490ns	0,0476ns	0,2924ns	0,1909ns
Vv	0,1379ns	-0,2132ns	0,1503ns	0,1871ns	-0,0278ns	0,0694ns
Radiação	0,2968ns	0,2465ns	0,1695ns	-0,0947ns	-0,1543ns	-0,2254ns
<b>Correlação Total (Pearson) Abril</b>						
T. máxima	0,0227ns	0,0112ns	0,2561ns	0,4079ns	0,2826ns	0,3738ns
T. mínima	0,1296ns	0,1150ns	0,2337ns	0,4575ns	0,3210ns	0,3315ns
UR	0,0454ns	0,0688ns	0,1173ns	0,0257ns	0,0147ns	0,042ns
Vv	0,2603ns	0,0640ns	0,2299ns	0,0312ns	-0,0129ns	-0,1072ns
Radiação	0,0018ns	-0,0042ns	0,1702ns	0,0008ns	-0,0340ns	-0,0728ns
<b>Correlação Total (Pearson) Maio</b>						
T. máxima	0,2710ns	0,4181ns	0,3454ns	<b>0,5191**</b>	0,4130ns	0,3827ns
T. mínima	0,2556ns	0,3488ns	0,3239ns	<b>0,5050**</b>	0,3757ns	0,3577ns
UR	0,0803ns	0,0264ns	-0,0284ns	0,0365ns	-0,0179ns	0,0248ns
Vv	-0,041ns	-0,2033ns	0,1484ns	0,1222ns	-0,0939ns	-0,0175ns
Radiação	0,0541ns	-0,0038ns	-0,1164ns	-0,1589ns	-0,0184ns	-0,1420ns



Conforme Tabelas 1A a 10A (Apêndice), não se identificou tendência clara de correlação ao longo de todo o período experimental. Mas pode-se notar que em todos os níveis de água no evaporatório, nos meses de setembro e outubro, os elementos climatológicos que apresentaram maior correlação com a evapotranspiração estimada pelo Irrigâmetro foram umidade relativa, radiação, temperatura máxima e temperatura mínima (Tabelas 2A e 3A). Comportamento semelhante ocorreu no mês de janeiro, mas apenas nos níveis N1 e N2 de água no evaporatório, sendo nos demais níveis as correlações totais não significativas pelo teste t. Entretanto, em todos os meses da pesquisa a menor correlação com a variável principal foi obtida pelo elemento climatológico velocidade do vento, sendo não significativa pelo teste t, de maneira que se apresentou com a variável menos importante no processo evaporativo do Irrigâmetro. Caixeta (2009), em seu estudo, descreveu que a temperatura mínima apresentou a menor correlação com a variável principal, enquanto a velocidade do vento apresentou correlação não significativa. Isso pode ter sido em decorrência da bordadura do evaporatório que possui aerodinâmica que reduz o efeito da ação do vento.

No mês de agosto, apenas a variável umidade relativa do ar apresentou correlação significativa com a variável principal, tendo efeito direto elevado apenas nos níveis N1, N2, N5 e N6. As estimativas dos efeitos diretos elevados e de sinais iguais aos dos coeficientes de correlação total, indicaram que a umidade relativa foi a principal variável na decomposição da evapotranspiração estimada pelo Irrigâmetro operando nos níveis N1, N2, N5 e N6. Isso evidencia que nesse mês, a variação na umidade relativa implica mudanças diretas na evapotranspiração estimada pelo Irrigâmetro ( $ET_1$ ). Assim, essa variável é o principal elemento climatológico na tentativa de explicar a variável dependente ( $ET_1$ ) no mês de agosto.

As estimativas dos efeitos diretos elevados e de sinais iguais aos dos coeficientes de correlação total, em todos os níveis de água no evaporatório, indicaram que as variáveis temperatura mínima e umidade relativa foram as principais determinantes na composição da evapotranspiração no mês de setembro. No mês de outubro, as estimativas dos efeitos diretos elevados e de sinais iguais aos dos coeficientes de correlação total indicaram que as variáveis temperatura máxima e umidade relativa foram as principais determinantes na composição da variável principal. Assim, a variação na umidade relativa e na temperatura mínima, no mês de setembro e, umidade relativa e na temperatura máxima, no mês de outubro, implica mudanças diretas na

evapotranspiração estimada pelo Irrigâmetro, sendo as variáveis climatológicas principais na tentativa de explicar a variável dependente ( $ET_1$ ) nesses meses.

Os efeitos indiretos da variável temperatura máxima via temperatura mínima, da variável temperatura mínima via temperatura máxima e da variável umidade relativa via temperatura máxima e via temperatura mínima destacaram-se como os mais associados, na tentativa de explicar a evapotranspiração em todos os níveis de água no evaporatório nos meses de setembro e outubro. O coeficiente de correlação do efeito direto da temperatura máxima apresentou sinal positivo e igual ao da correlação total para a mesma variável, indicando que há relação direta entre a variável dependente evapotranspiração estimada pelo Irrigâmetro e a variável explicativa temperatura máxima, para o mês de outubro. O mesmo ocorreu com a variável temperatura mínima, no mês de setembro.

No mês de janeiro, as variáveis temperatura máxima, temperatura mínima, umidade relativa e radiação apresentaram correlação significativa com a variável principal nos níveis N1 e N2 de água no evaporatório do Irrigâmetro. Contudo, perceberam-se os efeitos indiretos da temperatura máxima, da temperatura mínima e da radiação via umidade relativa, que foram elevados e maiores que o efeito da variável residual. Percebeu-se também que o efeito direto da umidade relativa foi elevado e superior ao da variável residual, de maneira que, ocorrendo mudanças na variável umidade relativa, implica mudanças diretas na evapotranspiração estimada pelo Irrigâmetro. Portanto, essa variável é o principal elemento climatológico na tentativa de explicar a variável dependente ( $ET_1$ ) no mês de janeiro.

No mês de maio, percebeu-se que apenas no nível N4, correspondente a 4 cm de água no evaporatório do Irrigâmetro, houve correlação significativa pelo teste t a 1% de significância. No entanto, na decomposição da variável temperatura máxima notou-se efeito indireto elevado e maior que o efeito da variável residual, via temperatura mínima sobre a evapotranspiração do Irrigâmetro. Na decomposição da variável temperatura mínima, percebeu-se domínio do efeito direto sobre a evapotranspiração, sendo também maior que o efeito da variável residual. Isso mostra que mudanças na variável temperatura mínima implica mudanças diretas na evapotranspiração estimada pelo Irrigâmetro. Assim, essa variável é o principal elemento climatológico na tentativa de explicar a variável dependente ( $ET_1$ ) no mês de maio.

Nos meses de novembro, dezembro, fevereiro, março e abril, não se observaram correlações significativas pelo teste “t” a 1% de significância em nenhum dos níveis de

água no evaporatório do Irrigâmetro, não sendo possível, então, descrever a ação das variáveis climatológicas.

Em estudo realizado na região de Viçosa, MG, Caixeta (2009) observou que o efeito indireto da variável temperatura máxima via radiação destacou-se como o mais associado à evapotranspiração em todos os níveis de água no evaporatório do Irrigâmetro. De acordo com esse mesmo autor, houve relação direta entre a variável dependente evapotranspiração estimada pelo Irrigâmetro e a variável explicativa temperatura máxima. O efeito indireto da temperatura máxima via radiação foi elevado tanto quanto o efeito direto da temperatura máxima.

Amorim (1998), estudando as ligações da evapotranspiração com os elementos climáticos no Município de Governador Dix-Sept Rosado, situado na região agrícola de Mossoró, RN, observou que a insolação foi o elemento meteorológico de maior influência no processo de evapotranspiração e a temperatura média compensada, o elemento que apresentou menor efeito nesse processo.

Silveira (2002), analisando os componentes principais na investigação da estrutura multivariada da evapotranspiração no Estado do Ceará, verificou que, entre os elementos climatológicos estudados, os com maior peso no processo da evapotranspiração foram insolação e umidade relativa do ar, de forma semelhante ao encontrado nesta pesquisa nos meses de agosto, setembro e outubro. Na região Centro-Sul do Estado do Ceará, Andrade et al. (2003) constataram que as variáveis climatológicas investigadas com maior representatividade no processo da evapotranspiração foram insolação e velocidade do vento, enquanto as temperaturas máxima e mínima do ar apresentaram menor influência.

## 5. CONCLUSÕES

1. No nível de água no evaporatório igual a 4 cm, a evapotranspiração estimada pelo Irrigâmetro se aproximou da  $ET_0$  determinada pelo método de Penman-Monteith-FAO 56.
2. Para estimar a  $ET_0$  com uso do Irrigâmetro nos meses de agosto, setembro, outubro, novembro, dezembro, janeiro, fevereiro, março, abril e maio, deve-se operar o aparelho com níveis de água no evaporatório iguais a 4,1; 4,0; 3,6; 3,8; 3,3; 3,0; 2,5; 3,3; 3,0; e 2,9, respectivamente.
3. O coeficiente do Irrigâmetro aumentou exponencialmente com a elevação do nível da água dentro do evaporatório.
4. Nos meses de agosto e janeiro, o elemento climatológico que apresentou maior correlação com a estimativa da evapotranspiração foi a umidade relativa do ar; no mês de setembro foi a temperatura mínima e a umidade relativa do ar.
5. No mês de outubro, os elementos climatológicos que apresentaram maiores correlações com a estimativa da evapotranspiração do Irrigâmetro foram temperatura máxima e umidade relativa do ar, enquanto no mês de maio foi a temperatura mínima.

6. A velocidade do vento foi, entre as variáveis estudadas, a que apresentou as menores correlações e efeito não significativo com a evapotranspiração estimada pelo Irrigâmetro.
7. Nos meses de novembro, dezembro, fevereiro, março e abril, não se verificou nenhuma correlação significativa entre as variáveis independentes e a variável principal evapotranspiração.

## 6. REFERÊNCIAS

- ANA, 2007 - Agência Nacional de Águas. **“O Estado da Arte da Agricultura Irrigada e as Modernas Tecnologias no Uso Racional da Água na Irrigação”**. Disponível em: <http://www.ana.gov.br/AcoesAdministrativas/CDOC/palestras/AntonioFelix/FelixANA.pdf>>. Acesso em: 16 maio 2009.
- ALLEN, R. G. A Penman for all seasons. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 112, n. 4, p. 348-386, 1986.
- ALLEN, R. G.; JENSEN, M. E.; BORNAN, R. D. Operational estimates of reference evapotranspiration. **Agronomy Journal**, Madison, v. 81, p. 650-662, 1989.
- ALLEN, R. G.; SMITH, M.; PERRIER, A.; PEREIRA, L. S. An update for the definition of reference evapotranspiration. **ICID Bulletin**, v. 43, n. 2, p. 1-34, 1994.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 310 p. (Irrigation and Drainage Paper, 56).
- ALLEN, R. G. **REF-ET**: reference evapotranspiration calculator, Version 2.1. Idaho: Idaho University, 2000. 82 p.
- 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 (ET<sub>0</sub>)**. 1998. 56 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1998.

ANDRADE, E. M. et al. Investigação da estrutura multivariada da evapotranspiração na região centro sul do Ceará pela análise de componentes principais. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8, n. 1, p. 39-44, 2003.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. Viçosa, MG: UFV/ Imprensa Universitária, 2007. 625 p.

BERNARDO, S. Impacto Ambiental da irrigação no Brasil. **Rev. Engenharia na Agricultura** – Série Irrigação e Drenagem, Viçosa, MG; Departamento de Engenharia Agrícola, V. 1, n. 1, 1992. 7 p.

BURMAN, R. D.; NIXON, P. R.; WRIGHT, J. L. et al. Water requirements. In: JENSEN, M. E. (Ed.). **Design and operation of farm irrigation systems**. St. Joseph: ASAE, 1983. cap. 6, p. 189-232.

CAIXETA, S. P. **Efeitos de elementos meteorológicos na evapotranspiração estimada pelo Irrigâmetro nas condições climáticas da Zona da Mata mineira**. 2009. 52 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2009.

CARVALHO, S. P. **Métodos alternativos de estimação de coeficientes de trilha e índices de seleção, sob multicolinearidade**. 1995. 163 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1995.

CEMIG, 1993 - COMPANHIA ENERGÉTICA DE MINAS GERAIS. Disponível em: <<http://www.cemig.com.br>>. Acesso: em 23 maio 2009.

CHANG, J. **Climate and agriculture**. Chicago: Aldine Publishing, 1971. 296 p.

CHRISTOFIDIS, D. “Água de irrigação e segurança alimentar”. **Revista ITEM**, Belo Horizonte, n. 77, 1º TRIM, p. 16 - 21, 2008a, ISSN 0102-115x.

CHRISTOFIDIS, D. “O futuro da irrigação e a gestão das águas”. **Revista ITEM**, Belo Horizonte, n. 80, 4º TRIM, p. 40 – 47, 2008b, ISSN 0102-115x.

CONTIN, F. S. **Tecnologia do Irrigâmetro aplicada no manejo da irrigação do feijoeiro**. 2008. 62 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2008.

CRUZ, C. D.; REGAZZI, A. J. **Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético**. Viçosa, MG: UFV, 1994. 390 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).

ESPÍNDULA NETO, D. **Uso racional de água e de energia elétrica na cafeicultura irrigada por pivô central e gotejamento**. 2002. 126 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG - 2002.

HOUNAM, C. E. **Comparison between pan and lake evaporation**. Geneva: World Meteorological Organization, 1973. 52 f. (Tech. Note, 126; WMO, 354).

JENSEN, M. E.; BURMAN, R. D.; ALLEN, R. G. **Evapotranspiration and irrigation water requirements**. New York: ASCE, 1990. 332 p.

LEMON, E. R.; GLASER, A. H.; SATTERWHITE, L. E. Some aspects of the relationship of soil, plant and meteorological factors to evapotranspiration. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 21, n. 5, p. 464-8, 1957.

LEY, T. W.; HILL, R. W.; JENSEN, D. T. Errors in Penman-Wright alfalfa reference evapotranspiration estimates: I. Model sensitivity analyses. **Transaction of ASAE**, St. Joseph, v. 37, n. 6, p. 1853-1861, 1994a.

LEY, T. W.; HILL, R. W.; JENSEN, D. T. Errors in Penman-Wright alfalfa reference evapotranspiration estimates: II. Effects of weather sensor measurement variability. **Transaction of ASAE**, St. Joseph, v.37, n.6, p.1863-1870, 1994b.

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, Piracicaba, SP, 2002.

OLIVEIRA, E. M.; OLIVEIRA, R. A.; BAPTESTINI, J. C. M. Ajuste do Irrigâmetro para estimar a evapotranspiração da cultura, por meio da variação da área do evaporatório. In: SIMPÓSIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, Viçosa, MG, 2007a, Viçosa, MG: **Anais...** UFV, CD-ROM.

OLIVEIRA, E. M.; OLIVEIRA, R. A.; TAGLIAFERRE, C.; SEDYIAMA, G. C. Ajuste do Irrigâmetro para estimar a evapotranspiração da cultura nos seus diversos estádios de desenvolvimento. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 2007b, Bonito, MS. **Anais...** Bonito, MS: SBEA, 2007b. CD-ROM.

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

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



PAULA, A. L. T. de. **Tecnologia do Irrigâmetro e da válvula intermitente para aspersor aplicada no perímetro irrigado do Jaíba**. 2009. 80 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2009.

PAZ, V. P. S.; TEODORO, E. T. ;MENDONÇA, F. C. Recursos Hídricos, Agricultura Irrigada e Meio Ambiente. Comunicado Técnico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, PB, DEAg/UFPB, v. 4, n. 3, p. 465-473, 2000.

PENMAN, H. I. Evaporation: an introductory survey. Netherlands. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v. 4, p. 9-29, 1956.

PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA, G. C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba, SP: FEALQ, 1997. 183 p.

GENES - **Programa para Análise e Processamento de Dados Baseado em Modelos de Genética e Estatística Experimental, versão 2007.0.0**. Fundação Arthur Bernardes - Viçosa, MG: UFV/2007.

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, v. 7, n. 2, p. 263-268, 2003.

SANTOS, S. S. dos. **Influência da aplicação, via irrigação por gotejamento, de esgoto sanitário tratado na cultura do cafeeiro e no solo**. 2004. 70 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2004.

SEDIYAMA, G. C. **Necessidade de água para os cultivos**. Brasília: ABEAS, 1996. 176 p.

SILVEIRA, S. S.; ANDRADE, E. M. DE. Análise de componentes principais na investigação de estrutura multivariada da evapotranspiração. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 22, n. 2, p. 173-177, 2002.

SLEIGHT, R. B. Evaporation from the surfaces of water and river-bed materials. **Journal of Agricultural Research**, Washington, v. 10, n. 5, p. 209-262, 1917.

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

SOUZA FILHO, H. M. et al. Agricultura Familiar e Tecnologia no Brasil: características, desafios e obstáculos. In: Congresso da sociedade brasileira de economia e sociologia rural, 42., 2004, Cuiabá, MT. **Anais...** Cuiabá, UFMT, 2004.

TAGLIAFERRE, C. **Desempenho do Irrigâmetro e de dois minievaporímetros para estimativa da evapotranspiração de referência.** 2006. 99 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2006.

TAGLIAFERRE, C. **Geração de tecnologia inovadora aplicada ao Irrigâmetro para o manejo racional da água de irrigação.** 2007. 50 f. Relatório (Pós-Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2007.

VILLA NOVA, N. A. **Principais métodos de estimativa de aplicação de água de irrigação.** Piracicaba, SP: Departamento de Física e Meteorologia, ESALQ/USP, 1987. 22 p.

WILLMOTT, C. J.; CKLESON, S. G.; DAVIS, R. E. Statistics for evaluation and comparasion of models. **Journal of Geophysical Research**, Ottawa, v. 90, n. C5, p. 8995-9005, 1985.

WRIGTH, S. Correlation and causation. **Journal of Agricultural Research**, Washington, v. 20, 1921.

## APÊNDICE A

Tabela 1A - Estimativa dos efeitos diretos e indiretos e correlação total entre a variável evapotranspiração obtida no Irrigâmetro e as variáveis temperatura máxima, temperatura mínima, umidade relativa, velocidade do vento e radiação no mês de agosto

<b>Temperatura máxima</b>	<b>Nível 1</b>	<b>Nível 2</b>	<b>Nível 3</b>	<b>Nível 4</b>	<b>Nível 5</b>	<b>Nível 6</b>
Direto sobre ET	<b>-1,1640</b>	<b>-0,8253</b>	-0,2609	<b>-0,9743</b>	-0,4830	-0,4304
Indireto via T mín	0,9409	0,5697	-0,0736	0,6492	0,2566	0,0947
Indireto via Ur	0,3660	0,3710	0,2161	0,2867	0,3839	0,3697
Indireto via Vv	0,0307	-0,0206	0,0222	-0,0529	-0,0706	-0,0978
Indireto via Rad	-0,0358	-0,0366	-0,0191	-0,0172	-0,0370	-0,0331
Total (cor. Pearson)	0,1379ns	0,0583ns	-0,1153ns	-0,1083ns	0,0499ns	-0,0069ns
<b>Temperatura mínima</b>						
Direto sobre ET	<b>0,9738</b>	0,5897	-0,0762	0,6719	0,2655	0,0980
Indireto via T máx	-1,1247	-0,7974	-0,2520	-0,9414	-0,4667	-0,3289
Indireto via Ur	0,1541	0,1563	0,0910	0,1208	0,1617	0,1557
Indireto via Vv	0,0231	-0,0155	0,0167	-0,0398	-0,0532	-0,0738
Indireto via Rad	0,0518	0,0259	0,0135	0,0121	0,0261	0,0234
Total (cor. Pearson)	0,0518ns	-0,0410ns	-0,2070ns	-0,1763ns	-0,0665ns	-0,1254ns
<b>Umidade relativa</b>						
Direto sobre ET	<b>-1,0122</b>	<b>-1,0261</b>	-0,5977	-0,7933	<b>-1,062</b>	<b>-1,0224</b>
Indireto via T máx	0,4209	0,2984	0,0943	0,3523	0,1746	0,1231
Indireto via T mín	-0,1483	-0,0898	0,0116	-0,1023	-0,0404	-0,0149
Indireto via Vv	-0,0291	0,0195	-0,0211	0,0502	0,0671	0,0929
Indireto via Rad	0,2846	0,2912	0,1522	0,1366	0,2940	0,2634
Total (cor. Pearson)	-0,4841**	-0,5067**	-0,3606ns	-0,3565ns	-0,5665**	-0,5580**
<b>Velocidade do vento</b>						
Direto sobre ET	-0,0993	0,0665	-0,0718	0,1710	0,2285	0,3165
Indireto via T máx	0,3598	0,2551	0,0806	0,3012	0,1493	0,1052
Indireto via T mín	-0,2267	-0,1372	0,0177	-0,1564	-0,0618	-0,0228
Indireto via Ur	-0,2971	-0,3011	-0,1754	-0,2328	-0,3116	-0,3001
Indireto via Rad	0,0604	0,0618	0,0323	0,0290	0,0624	0,0559
Total (cor. Pearson)	-0,2028ns	-0,0549ns	-0,1165ns	0,1120ns	0,0668ns	0,1548ns
<b>Radiação</b>						
Direto sobre ET	-0,4090	-0,4185	-0,2187	-0,1964	-0,4225	-0,3784
Indireto via T máx	-0,1019	-0,0722	-0,0228	-0,0853	-0,0423	-0,0298
Indireto via T mín	-0,0603	-0,0365	0,0047	-0,0416	-0,0164	-0,0061
Indireto via Ur	0,7044	0,7140	0,4159	0,5521	0,7389	0,7115
Indireto via Vv	0,0147	-0,0098	0,0106	-0,0253	-0,0338	-0,0468
Total (cor. Pearson)	0,1479ns	0,1370ns	0,1897ns	0,2035ns	0,2239ns	0,2504ns
Coef Determinação	0,34	0,37	0,23	0,25	0,48	0,51
Ef. variável residual	0,81	0,79	0,88	0,87	0,72	0,70

ns Não significativo pelo teste t; e \*\* Significativo a 1%, pelo teste t

Tabela 2A - Estimativa dos efeitos diretos e indiretos e correlação total entre a variável evapotranspiração obtida no Irrigâmetro e as variáveis temperatura máxima, temperatura mínima, umidade relativa, velocidade do vento e radiação no mês de setembro

<b>Temperatura máxima</b>	<b>Nível 1</b>	<b>Nível 2</b>	<b>Nível 3</b>	<b>Nível 4</b>	<b>Nível 5</b>	<b>Nível 6</b>
Direto sobre ET	<b>-1,4380</b>	<b>-1,7898</b>	<b>-2,2929</b>	<b>-2,7294</b>	<b>-1,1111</b>	<b>-1,0773</b>
Indireto via T mín	1,7065	2,0938	2,5514	2,7795	1,4046	1,1619
Indireto via Ur	0,4986	0,5240	0,4826	0,5003	0,5077	0,6166
Indireto via Vv	-0,0136	-0,0160	-0,0007	-0,0169	-0,0173	-0,0145
Indireto via Rad	0,0519	-0,0045	0,0729	0,1315	0,0001	-0,0151
Total (cor. Pearson)	0,8036**	0,8076**	0,8134**	0,6650**	0,7839**	0,6717**
<b>Temperatura mínima</b>						
Direto sobre ET	<b>1,7209</b>	<b>2,1114</b>	<b>2,5729</b>	<b>2,8029</b>	<b>1,4165</b>	<b>1,1718</b>
Indireto via T máx	-1,4259	-1,7749	-2,2737	-2,7056	-1,1018	-1,0683
Indireto via Ur	0,4485	0,4731	0,4357	0,4517	0,4584	0,5567
Indireto via Vv	-0,0066	-0,0077	-0,0003	-0,0082	-0,0084	-0,0070
Indireto via Rad	0,0425	-0,0037	0,0596	0,1076	0,0001	-0,0123
Total (cor. Pearson)	0,7793**	0,7984**	0,7942**	0,6475**	0,7647**	0,6408**
<b>Umidade relativa</b>						
Direto sobre ET	<b>-0,6680</b>	<b>-0,7047</b>	<b>0,6489</b>	<b>-0,6727</b>	<b>-0,6827</b>	<b>-0,8291</b>
Indireto via T máx	1,0694	1,3310	1,7050	2,0297	0,8263	0,8012
Indireto via T mín	-1,1555	-1,4177	-1,7276	-1,8820	-0,9511	-0,7868
Indireto via Vv	0,0353	0,0415	0,0017	0,0439	0,0450	0,0375
Indireto via Rad	-0,0905	0,0078	-0,1270	-0,2292	-0,0002	0,0263
Total (cor. Pearson)	-0,8093**	-0,7420**	-0,7967**	-0,7104**	-0,7626**	-0,7569**
<b>Velocidade do vento</b>						
Direto sobre ET	0,1196	0,1405	0,0059	0,1487	0,1526	0,1272
Indireto via T máx	0,1636	0,2036	0,2608	0,3105	0,1264	0,1225
Indireto via T mín	-0,0946	-0,1161	-0,1415	-0,1541	-0,0779	-0,0644
Indireto via Ur	-0,1972	-0,2080	-0,1916	-0,1986	-0,2015	-0,2447
Indireto via Rad	-0,0029	0,0002	-0,0040	-0,0073	-0,0001	0,0008
Total (cor. Pearson)	-0,0115ns	0,0203ns	-0,0704ns	0,0992ns	-0,0004ns	-0,0586ns
<b>Radiação</b>						
Direto sobre ET	0,1208	-0,0105	0,1696	0,3060	0,0002	-0,0351
Indireto via T máx	-0,6179	-0,7691	-0,9853	-1,1729	-0,4775	-0,4629
Indireto via T mín	0,6051	0,7424	0,9046	0,9855	0,4980	0,4120
Indireto via Ur	0,5003	0,5278	0,4861	0,5039	0,5114	0,6210
Indireto via Vv	-0,0028	-0,0033	-0,0001	-0,0035	-0,0036	0,0030
Total (cor. Pearson)	0,6054**	0,4873**	0,574**	0,6190**	0,5285**	0,5319**
Coef determinação	0,80	0,76	0,79	0,68	0,73	0,62
Ef. variável residual	0,45	0,49	0,45	0,56	0,52	0,61

ns Não significativo pelo teste t; e \*\* Significativo a 1%, pelo teste t

Tabela 3A - Estimativa dos efeitos diretos e indiretos e correlação total entre a variável evapotranspiração obtida no Irrigâmetro e as variáveis temperatura máxima, temperatura mínima, umidade relativa, velocidade do vento e radiação para o mês de outubro

<b>Temperatura máxima</b>	<b>Nível 1</b>	<b>Nível 2</b>	<b>Nível 3</b>	<b>Nível 4</b>	<b>Nível 5</b>	<b>Nível 6</b>
Direto sobre ET	<b>3,0537</b>	<b>2,7021</b>	0,4510	<b>4,5044</b>	<b>8,3854</b>	<b>4,7386</b>
Indireto via T mín	-2,6523	-2,3717	-0,2784	-4,0367	-7,6806	-4,5706
Indireto via Ur	0,7943	0,8330	1,0052	0,6325	0,1593	0,6605
Indireto via Vv	-0,2586	-0,2396	-0,2726	-0,1441	-0,1314	-0,0603
Indireto via Rad	-0,3599	-0,3426	-0,2928	-0,3812	-0,1891	-0,1933
Total (cor. Pearson)	0,5770**	0,5813**	0,6123**	0,5748**	-0,5437**	0,5748**
<b>Temperatura mínima</b>						
Direto sobre ET	<b>-2,6597</b>	<b>-2,3784</b>	-0,2792	<b>-4,0486</b>	<b>-7,7032</b>	<b>-4,5841</b>
Indireto via T máx	3,0451	2,6946	0,4497	4,4911	8,3607	4,7246
Indireto via Ur	0,7672	0,8046	0,9709	0,6094	0,1535	0,6364
Indireto via Vv	-0,2544	-0,2357	-0,2682	-0,1417	-0,1293	-0,0593
Indireto via Rad	-0,3564	-0,3392	-0,2900	-0,3670	-0,1820	-0,1861
Total (cor. Pearson)	0,5417**	0,5459**	0,5832**	0,5431**	0,4998**	0,5315**
<b>Umidade Relativa</b>						
Direto sobre ET	<b>-0,8981</b>	<b>-0,9420</b>	<b>-1,1366</b>	<b>-0,7187</b>	<b>-0,1811</b>	<b>-0,7505</b>
Indireto via T máx	-2,7006	-2,3897	-0,3988	-3,9642	-7,3799	-4,1703
Indireto via T mín	2,2721	2,0317	0,2385	3,4331	6,5322	3,8873
Indireto via Vv	0,3149	0,2918	0,3320	0,1765	0,1610	0,0738
Indireto via Rad	0,2997	0,2853	0,2439	0,4081	0,2023	0,2069
Total (cor. Pearson)	-0,7119**	-0,7229**	-0,7210**	-0,6651**	-0,6654**	-0,7428**
<b>Velocidade do vento</b>						
Direto sobre ET	0,4827	0,4473	0,5089	0,2867	0,2614	0,1199
Indireto via T máx	-1,6359	-1,4476	-0,2416	-2,2651	-4,2167	-2,3828
Indireto via T mín	1,4017	1,2534	0,1471	2,0020	3,8091	2,2668
Indireto via Ur	-0,5859	-0,6145	-0,7415	-0,4425	-0,1115	-0,4621
Indireto via Rad	-0,0259	-0,0247	-0,0211	0,1004	0,0498	0,0509
Total (cor. Pearson)	-0,3633ns	-0,3862ns	-0,3481ns	-0,3184ns	-0,2078ns	-0,4073ns
<b>Radiação</b>						
Direto sobre ET	<b>-0,5975</b>	<b>-0,5687</b>	-0,4861	-0,5266	-0,2611	-0,2670
Indireto via T máx	1,8395	1,6277	0,2716	3,2606	6,0701	3,4302
Indireto via T mín	-1,5865	-1,4187	-0,1665	-2,8115	-5,3685	-3,1947
Indireto via Ur	0,4506	0,4726	0,5702	0,5569	0,1403	0,5816
Indireto via Vv	0,0209	0,0194	0,0221	-0,0547	-0,0498	-0,0229
Total (cor. Pearson)	0,1270ns	0,1323ns	0,2113ns	0,4148ns	0,5400**	0,5271**
Coef determinação	0,71	0,70	0,65	0,56	0,64	0,66
Ef. variável residual	0,54	0,54	0,59	0,66	0,60	0,58

ns Não significativo pelo teste t; e \*\* Significativo a 1%, pelo teste t

Tabela 4A - Estimativa dos efeitos diretos e indiretos e correlação total entre a variável evapotranspiração obtida no Irrigâmetro e as variáveis temperatura máxima, temperatura mínima, umidade relativa, velocidade do vento e radiação no mês de novembro

<b>Temperatura máxima</b>	<b>Nível 1</b>	<b>Nível 2</b>	<b>Nível 3</b>	<b>Nível 4</b>	<b>Nível 5</b>	<b>Nível 6</b>
Direto sobre ET	-0,6231	-0,1063	-0,1330	<b>1,1859</b>	0,5192	-0,3080
Indireto via T mín	0,5452	-0,0205	0,0337	-1,6215	-0,6099	-0,0554
Indireto via Ur	0,4359	0,5103	0,5115	0,6022	0,5090	0,6794
Indireto via Vv	0,0003	-0,0006	0,0004	-0,0005	0,0010	0,0038
Indireto via Rad	-0,1569	-0,2055	-0,2113	-0,2581	-0,2310	-0,1036
Total (cor. Pearson)	0,2014ns	0,1773ns	0,2013ns	-0,0889ns	0,1883ns	0,2161ns
<b>Temperatura mínima</b>						
Direto sobre ET	0,5472	-0,0206	0,0338	<b>-1,6274</b>	-0,6121	-0,0556
Indireto via T máx	-0,6209	-0,1059	-0,1325	1,1817	0,5174	-0,3069
Indireto via Ur	0,4283	0,5015	0,5027	0,5919	0,5002	0,6676
Indireto via Vv	-0,0003	0,0006	-0,0004	0,0005	-0,0010	-0,0038
Indireto via Rad	-0,1463	-0,1920	-0,1971	-0,2380	-0,2156	-0,0967
Total (cor. Pearson)	0,2080ns	0,1836ns	0,2064ns	-0,0915ns	0,1889ns	0,2045ns
<b>Umidade relativa</b>						
Direto sobre ET	-0,4721	-0,5528	-0,5541	-0,6523	-0,5514	-0,7359
Indireto via T máx	0,5753	0,0981	0,1230	-1,0949	-0,4794	0,2944
Indireto via T mín	-0,4964	0,0187	-0,0307	1,4764	0,5553	0,0505
Indireto via Vv	-0,0032	0,0062	-0,0044	0,0057	-0,0105	-0,0418
Indireto via Rad	0,1334	0,1750	0,1797	0,2169	0,1964	0,0881
Total (cor. Pearson)	-0,2631ns	-0,02548ns	-0,2867ns	-0,0481ns	-0,2895ns	-0,3548ns
<b>Velocidade do vento</b>						
Direto sobre ET	0,0205	-0,0393	0,0278	-0,0363	0,0666	0,2643
Indireto via T máx	-0,0090	-0,0015	-0,0019	0,0171	0,0075	-0,0044
Indireto via T mín	-0,0080	0,0003	-0,0005	0,0237	0,0089	0,0008
Indireto via Ur	0,0748	0,0875	0,0878	0,1033	0,0873	0,1165
Indireto via Rad	0,1228	0,1612	0,1655	0,1998	0,1810	0,0812
Total (cor. Pearson)	0,2011ns	0,2082ns	0,2787ns	0,3077ns	0,3513ns	0,4584ns
<b>Radiação</b>						
Direto sobre ET	-0,3318	-0,4354	-0,4471	-0,5397	-0,4887	-0,2192
Indireto via T máx	-0,2945	-0,0502	-0,0628	0,5605	0,2454	-0,1456
Indireto via T mín	0,2413	-0,0091	0,0149	-0,7178	-0,2699	-0,0245
Indireto via Ur	0,1899	0,2222	0,2227	0,2622	0,2216	0,2958
Indireto via Vv	-0,0075	0,0145	-0,0103	0,0134	-0,0247	-0,0979
Total (cor. Pearson)	-0,2028ns	-0,2579ns	-0,2826ns	-0,4214ns	-0,3164ns	-0,1914ns
Coef determinação	0,18	0,22	0,27	0,29	0,32	0,34
Ef. variável residual	0,90	0,88	0,85	0,84	0,82	0,80

ns Não significativo pelo teste t; e \*\* Significativo a 1%, pelo teste t

Tabela 5A - Estimativa dos efeitos diretos e indiretos e correlação total entre a variável evapotranspiração obtida no Irrigâmetro e as variáveis temperatura máxima, temperatura mínima, umidade relativa, velocidade do vento e radiação no mês de dezembro

<b>Temperatura máxima</b>	<b>Nível 1</b>	<b>Nível 2</b>	<b>Nível 3</b>	<b>Nível 4</b>	<b>Nível 5</b>	<b>Nível 6</b>
Direto sobre ET	-0,4853	0,0517	0,0491	0,3613	0,1078	0,2369
Indireto via T mín	-0,2189	-0,3233	-0,3844	-0,7729	-0,4351	-0,8469
Indireto via Ur	-0,1093	0,0013	-0,0049	-0,0204	-0,0624	-0,0666
Indireto via Vv	0,0612	0,0543	-0,0419	0,2787	0,2847	0,2905
Indireto via Rad	0,5357	0,1024	0,0786	0,0774	-0,0665	0,1825
Total (cor. Pearson)	-0,2164ns	-0,1136ns	-0,3034ns	-0,0759ns	-0,1715ns	-0,2034ns
<b>Temperatura mínima</b>						
Direto sobre ET	-0,2676	-0,3943	-0,4688	<b>-0,9452</b>	-0,5321	<b>-1,0356</b>
Indireto via T máx	-0,3969	0,0424	0,0403	0,2954	0,0882	0,1938
Indireto via Ur	-0,3304	0,0043	-0,0160	-0,0615	-0,1887	-0,2013
Indireto via Vv	0,0848	0,0775	-0,0599	0,3861	0,3944	0,4024
Indireto via Rad	0,7035	0,1425	0,1094	0,1016	-0,0873	0,2398
Total (cor. Pearson)	-0,2065ns	-0,1276ns	-0,3951ns	-0,2235ns	-0,3255ns	-0,4009ns
<b>Umidade relativa</b>						
Direto sobre ET	0,6640	-0,0092	0,0347	0,1237	0,3793	0,4046
Indireto via T máx	0,0799	-0,0073	-0,0069	-0,0595	-0,0177	-0,0390
Indireto via T mín	0,1331	0,1821	0,2165	0,4703	0,2648	0,5153
Indireto via Vv	-0,0588	-0,0449	0,0347	-0,2678	-0,2736	-0,2791
Indireto via Rad	-0,7274	-0,1671	-0,1283	-0,1051	0,0903	-2479
Total (cor. Pearson)	0,0909ns	-0,0464ns	0,1508ns	0,1617ns	0,4430ns	0,3538ns
<b>Velocidade do vento</b>						
Direto sobre ET	0,1649	0,1558	-0,1204	<b>0,7506</b>	<b>0,7667</b>	<b>0,7822</b>
Indireto via T máx	-0,1802	0,0180	0,0171	0,1341	0,0400	0,0880
Indireto via T mín	-0,1377	-0,1963	-0,2333	-0,4862	-0,2737	-0,5327
Indireto via Ur	-0,2370	0,0027	-0,0100	-0,0441	-0,1353	-0,1443
Indireto via Rad	0,3275	0,0701	0,0539	0,0473	-0,0406	0,1116
Total (cor. Pearson)	-0,0625ns	0,0504ns	-0,2928ns	0,4017ns	0,3570ns	0,3447ns
<b>Radiação</b>						
Direto sobre ET	<b>0,9288</b>	0,2218	-0,1703	0,1342	-0,1152	0,3166
Indireto via T máx	-0,2799	0,0239	0,0227	0,2084	0,0622	0,1367
Indireto via T mín	-0,2027	-0,2533	-0,3011	-0,7159	-0,4031	-0,7844
Indireto via Ur	-0,5801	0,0069	-0,0261	-0,0969	-0,2970	-0,3169
Indireto via Vv	0,0581	0,0493	-0,0380	0,2647	0,2703	0,2758
Total (cor. Pearson)	-0,0158ns	0,0486ns	-0,1724ns	-0,2057ns	-0,4828**	-0,3722ns
Coef determinação	0,20	0,06	0,18	0,48	0,65	0,63
Ef. variável residual	0,90	0,97	0,94	0,72	0,59	0,61

ns Não significativo pelo teste t; e \*\* Significativo a 1%, pelo teste t

Tabela 6A - Estimativa dos efeitos diretos e indiretos e correlação total entre a variável evapotranspiração obtida no Irrigâmetro e as variáveis temperatura máxima, temperatura mínima, umidade relativa, velocidade do vento e radiação no mês de janeiro

<b>Temperatura máxima</b>	<b>Nível 1</b>	<b>Nível 2</b>	<b>Nível 3</b>	<b>Nível 4</b>	<b>Nível 5</b>	<b>Nível 6</b>
Direto sobre ET	0,1773	0,3848	0,0663	<b>1,9600</b>	<b>2,8287</b>	<b>3,0997</b>
Indireto via T mín	-0,0463	-0,5339	0,1057	-2,1398	-2,5020	-2,7284
Indireto via Ur	-1,0661	-0,8917	-0,6910	-0,3178	-0,2953	-0,2744
Indireto via Vv	0,0621	0,0141	0,0542	0,0778	-0,0798	-0,0867
Indireto via Rad	0,2757	0,3021	0,3406	0,3188	0,2561	0,3375
Total (cor. Pearson)	<b>-0,5974**</b>	<b>-0,7247**</b>	-0,1241ns	-0,1001ns	0,2078ns	0,3477ns
<b>Temperatura mínima</b>						
Direto sobre ET	-0,0474	<b>-0,5463</b>	<b>0,1081</b>	<b>-2,1894</b>	<b>-2,5600</b>	<b>-2,7917</b>
Indireto via T máx	0,1732	0,3760	0,0648	1,9156	2,7646	3,0294
Indireto via Ur	-1,1309	-0,9460	-0,7330	-0,3371	-,03132	-0,2911
Indireto via Vv	0,0507	0,0115	0,0443	0,0636	-0,0652	-0,0708
Indireto via Rad	0,3065	0,3358	0,3786	0,3543	0,2847	0,3751
Total (cor. Pearson)	<b>-0,6479**</b>	<b>-0,7689**</b>	-0,1371ns	-0,1929ns	0,1107ns	0,2508ns
<b>Umidade relativa</b>						
Direto sobre ET	<b>-1,3476</b>	<b>-1,1272</b>	-0,8735	-0,4017	-0,3733	-0,3469
Indireto via T máx	0,1402	0,3044	0,0525	1,5506	2,2379	2,4522
Indireto via T mín	-0,0397	-0,4585	0,0907	-1,8375	-2,1485	-2,3430
Indireto via Vv	0,0688	0,0156	0,0601	0,0864	-0,0886	-0,0961
Indireto via Rad	0,3905	0,4280	0,4825	0,4516	0,3628	0,4781
Total (cor. Pearson)	<b>-0,7877**</b>	<b>-0,8377**</b>	-0,1875ns	-0,1506ns	-0,0097ns	0,1442ns
<b>Velocidade do vento</b>						
Direto sobre ET	-0,1660	-0,0377	-0,1450	-0,2083	0,2136	0,2319
Indireto via T máx	-0,0662	-0,1438	-0,0248	-0,7323	-1,0573	-1,1586
Indireto via T mín	0,0144	0,1668	-0,0330	0,6687	0,7819	0,8527
Indireto via Ur	0,5587	0,4674	0,3621	0,1665	0,1548	0,1438
Indireto via Rad	-0,1146	-0,1256	-0,1416	-0,1325	-0,1065	-0,1403
Total (cor. Pearson)	0,2262ns	0,3270ns	0,0176ns	-0,2385ns	-0,0134ns	-0,0704ns
<b>Radiação</b>						
Direto sobre ET	-0,4583	<b>-0,5022</b>	-0,5662	-0,5299	-0,4257	-0,5610
Indireto via T máx	-0,1066	-0,2315	-0,0398	-1,1790	-1,7017	-1,8646
Indireto via T mín	0,0317	0,3653	-0,0722	1,4640	1,7118	1,8668
Indireto via Ur	1,1484	0,9606	0,7443	0,3423	0,3180	0,2956
Indireto via Vv	-0,0415	-0,0094	-0,0363	-0,0521	0,0534	0,0580
Total (cor. Pearson)	<b>0,5736**</b>	<b>0,5827**</b>	0,0396ns	0,0452ns	-0,0440ns	-0,2052ns
Coef determinação	0,69	0,78	0,12	0,31	0,32	0,43
Ef. variável residual	0,56	0,47	0,94	0,83	0,82	0,76

ns Não significativo pelo teste t; e \*\* Significativo a 1%, pelo teste t



Tabela 7A - Estimativa dos efeitos diretos e indiretos e correlação total entre a variável evapotranspiração obtida no Irrigâmetro e as variáveis temperatura máxima, temperatura mínima, umidade relativa, velocidade do vento e radiação para o mês de fevereiro

<b>Temperatura máxima</b>	<b>Nível 1</b>	<b>Nível 2</b>	<b>Nível 3</b>	<b>Nível 4</b>	<b>Nível 5</b>	<b>Nível 6</b>
Direto sobre ET	0,6906	<b>1,0065</b>	<b>1,0239</b>	<b>1,6804</b>	<b>1,4857</b>	<b>1,0525</b>
Indireto via T mín	-0,6085	-0,9006	-0,9425	-1,5344	-1,4237	-1,0054
Indireto via Ur	-0,1182	-0,1136	-0,1074	-0,1326	-0,1453	-0,1384
Indireto via Vv	0,0062	0,0045	0,0044	0,0028	0,0056	0,0078
Indireto via Rad	-0,1237	-0,1177	-0,1058	-0,0919	-0,0836	-0,1001
Total (cor. Pearson)	-0,1532ns	-0,1209ns	-0,1274ns	-0,0752ns	-0,1613ns	-0,1836ns
<b>Temperatura mínima</b>						
Direto sobre ET	-0,6412	<b>-0,9489</b>	<b>-0,9931</b>	<b>-1,6163</b>	<b>-1,5000</b>	<b>-1,0593</b>
Indireto via T máx	0,6555	0,9493	0,9718	1,5948	1,4100	0,9989
Indireto via Ur	-0,1237	-0,1189	-0,1127	-0,1388	-0,1520	-0,1449
Indireto via Vv	-0,0208	-0,0139	-0,0137	-0,0087	-0,0174	-0,0244
Indireto via Rad	-0,1141	-0,1086	-0,0976	-0,0846	-0,0771	-0,0923
Total (cor. Pearson)	-0,2445ns	-0,2356ns	-,02450ns	-0,2538ns	-0,3367ns	-0,3221ns
<b>Umidade relativa</b>						
Direto sobre ET	-0,4621	-0,4442	-0,4198	-0,5182	-0,5679	-0,5410
Indireto via T máx	0,1767	0,2576	0,2620	0,4300	0,3802	0,2693
Indireto via T mín	-0,1717	-0,2541	-0,2660	-0,4329	-0,4018	-0,2837
Indireto via Vv	0,0641	0,0429	0,0422	0,0269	0,0535	0,0752
Indireto via Rad	0,4606	0,4380	0,3939	0,3391	0,3112	0,3726
Total (cor. Pearson)	0,0676ns	0,0403ns	0,0124ns	-0,1550ns	-0,2247ns	-0,1075ns
<b>Velocidade do vento</b>						
Direto sobre ET	-0,3397	-0,2275	-0,2239	-0,1427	-0,2835	-0,3983
Indireto via T máx	-0,0136	-0,0198	-0,0202	-0,0331	-0,0293	-0,0208
Indireto via T mín	-0,0394	-0,0581	-0,0606	-0,0990	-0,0919	-0,0648
Indireto via Ur	0,0872	0,0838	0,0792	0,0978	0,1072	0,1021
Indireto via Rad	-0,0822	-0,0783	-0,0704	-0,0606	-0,0556	-0,0665
Total (cor. Pearson)	-0,3877ns	-0,2998ns	-0,2960ns	-0,2376ns	-0,3531ns	-0,4484ns
<b>Radiação</b>						
Direto sobre ET	-0,6150	-0,5860	-0,5260	-0,4534	-0,4156	-0,4975
Indireto via T máx	0,1389	0,2025	0,2060	0,3398	0,2989	0,2117
Indireto via T mín	-0,1190	-0,1761	-0,1843	-0,3016	-0,2784	-0,1966
Indireto via Ur	0,3460	0,3325	0,3144	0,3876	0,4253	0,4051
Indireto via Vv	-0,0454	-0,0304	-0,0299	-0,0190	-0,0379	-0,0533
Total (cor. Pearson)	-0,2945ns	-0,2564ns	-0,2199ns	-0,0466ns	-0,0077ns	-0,1306ns
Coef determinação	0,33	0,30	0,29	0,41	0,50	0,45
Ef. variável residual	0,82	0,83	0,84	0,76	0,71	0,74

ns Não significativo pelo teste t; e \*\* Significativo a 1%, pelo teste t

Tabela 8A - Estimativa dos efeitos diretos e indiretos e correlação total entre a variável evapotranspiração obtida no Irrigâmetro e as variáveis temperatura máxima, temperatura mínima, umidade relativa, velocidade do vento e radiação para o mês março

<b>Temperatura máxima</b>	<b>Nível 1</b>	<b>Nível 2</b>	<b>Nível 3</b>	<b>Nível 4</b>	<b>Nível 5</b>	<b>Nível 6</b>
Direto sobre ET	-0,2581	-0,5020	0,1066	0,6084	0,3676	-0,1350
Indireto via T mín	0,1934	0,8235	-0,2557	-0,6274	-0,1906	0,2917
Indireto via Ur	0,1008	-0,2627	0,0201	-0,0498	-0,2955	-0,1231
Indireto via Vv	-0,0050	0,0031	-0,0073	-0,0086	-0,0039	-0,0029
Indireto via Rad	0,1802	0,1041	0,2274	0,0526	0,0178	-0,1744
Total (cor. Pearson)	0,2112ns	0,1660ns	0,0910ns	-0,0249ns	-0,1047ns	-0,1438ns
<b>Temperatura mínima</b>						
Direto sobre ET	0,2080	0,8859	-0,2751	-0,6750	-0,2050	0,3138
Indireto via T máx	-0,2399	-0,4667	0,0991	0,5655	0,3417	-0,1254
Indireto via Ur	0,1091	-0,2843	0,0217	-0,0539	-0,3198	-0,1332
Indireto via Vv	-0,0024	0,0015	-0,0035	-0,0042	-0,0019	-0,0014
Indireto via Rad	0,1941	0,1122	0,2449	0,0567	0,0192	-0,1878
Total (cor. Pearson)	0,2689ns	0,2488ns	0,0870ns	-0,1110ns	-0,1660ns	-0,1342ns
<b>Umidade relativa</b>						
Direto sobre ET	-0,1487	0,3875	-0,0296	0,0735	0,4360	0,1816
Indireto via T máx	0,1750	0,3403	-0,0723	-0,4125	-0,2492	0,0915
Indireto via T mín	-0,1526	-0,6500	0,2018	0,4953	0,1504	-0,2302
Indireto via Vv	-0,0372	0,0230	-0,0541	-0,0636	-0,0294	-0,0214
Indireto via Rad	-0,1544	-0,0892	-0,1948	-0,0451	-0,0153	0,1494
Total (cor. Pearson)	-0,3179ns	0,0117ns	-0,1490ns	0,0476ns	0,2924ns	0,1909ns
<b>Velocidade do vento</b>						
Direto sobre ET	0,1348	-0,0837	0,1964	0,2306	0,1068	0,0778
Indireto via T máx	0,0097	0,0188	-0,0040	-0,0228	-0,0137	0,0050
Indireto via T mín	-0,0038	-0,0162	0,0050	0,0123	0,0037	-0,0057
Indireto via Ur	0,0410	-0,1069	0,0082	-0,0203	-0,1202	-0,0501
Indireto via Rad	-0,0438	-0,0253	-0,0553	-0,0128	-0,0043	0,0424
Total (cor. Pearson)	0,1379ns	-0,2132ns	0,1503ns	0,1871ns	-0,0278ns	0,0694ns
<b>Radiação</b>						
Direto sobre ET	0,2537	0,1467	0,3201	0,0741	0,0251	-0,2456
Indireto via T máx	-0,1833	-0,3565	0,0757	0,4321	0,2610	-0,0958
Indireto via T mín	0,1591	0,6776	-0,2104	-0,5163	-0,1568	0,2400
Indireto via Ur	0,0905	-0,2358	0,0180	-0,0447	-0,2652	-0,1105
Indireto via Vv	-0,0232	0,0144	-0,0339	-0,0398	-0,0184	-0,0134
Total (cor. Pearson)	0,2968ns	0,2465ns	0,1695ns	-0,0947ns	-0,1543ns	-0,2254ns
Coef determinação	0,14	0,19	0,08	0,20	0,12	0,07
Ef. variável residual	0,93	0,89	0,96	0,95	0,94	0,96

ns Não significativo pelo teste t; e \*\* Significativo a 1%, pelo teste t

Tabela 9A - Estimativa dos efeitos diretos e indiretos e correlação total entre a variável evapotranspiração obtida no Irrigâmetro e as variáveis temperatura máxima, temperatura mínima, umidade relativa, velocidade do vento e radiação para o mês de abril

<b>Temperatura máxima</b>	<b>Nível 1</b>	<b>Nível 2</b>	<b>Nível 3</b>	<b>Nível 4</b>	<b>Nível 5</b>	<b>Nível 6</b>
Direto sobre ET	-0,5717	-0,6493	0,0564	-0,1945	-0,1997	0,3024
Indireto via T mín	0,9685	0,8770	0,4726	0,8737	0,7065	0,2452
Indireto via Ur	-0,2080	-0,1364	-0,1489	-0,1603	-0,1303	-0,1179
Indireto via Vv	-0,1843	-0,0811	-0,1066	-0,1062	-0,0853	-0,0549
Indireto via Rad	0,0181	0,0011	-0,0173	-0,0046	-0,0084	-0,0010
Total (cor. Pearson)	0,0227ns	0,0112ns	0,2561ns	0,4079ns	0,2826ns	0,3738ns
<b>Temperatura mínima</b>						
Direto sobre ET	<b>1,0643</b>	<b>0,9638</b>	0,5194	<b>0,9602</b>	0,7764	0,2695
Indireto via T máx	-0,5202	-0,5909	0,0513	-0,1770	-0,1818	0,2751
Indireto via Ur	0,2837	-0,1860	-0,2030	-0,2185	-0,1718	-0,1608
Indireto via Vv	-0,1686	-0,0743	-0,0976	-0,0972	-0,0781	-0,0503
Indireto via Rad	0,0379	0,0024	-0,0363	-0,0097	-0,0177	-0,0021
Total (cor. Pearson)	0,1296ns	0,1150ns	0,2337ns	0,4575ns	0,3210ns	0,3315ns
<b>Umidade relativa</b>						
Direto sobre ET	0,5741	0,3765	0,4109	0,4424	0,3596	0,3254
Indireto via T máx	0,2071	0,2353	-0,0204	0,0705	0,0724	-0,1095
Indireto via T mín	-0,5259	-0,4762	-0,2565	-0,4744	-0,3836	-0,1331
Indireto via Vv	-0,1415	-0,0623	-0,0819	-0,0816	-0,0656	-0,0422
Indireto via Rad	-0,0684	-0,0044	0,0654	0,0175	0,0319	0,0038
Total (cor. Pearson)	0,0454ns	0,0688ns	0,1173ns	0,0257ns	0,0147ns	0,042ns
<b>Velocidade do vento</b>						
Direto sobre ET	0,5456	0,2403	0,3159	0,3145	0,2528	0,1626
Indireto via T máx	0,1931	0,2193	-0,0190	0,0657	0,0675	-0,1021
Indireto via T mín	-0,3290	-0,2979	-0,1605	-0,2968	-0,2400	-0,0833
Indireto via Ur	-0,1490	-0,0977	-0,1066	-0,1148	-0,0933	-0,0844
Indireto via Rad	-0,0003	0,0001	0,0003	0,0001	0,0001	0,0001
Total (cor. Pearson)	0,2603ns	0,0640ns	0,2299ns	0,0312ns	-0,0129ns	-0,1072ns
<b>Radiação</b>						
Direto sobre ET	0,0980	0,0063	-0,0937	-0,0251	-0,0458	-0,0055
Indireto via T máx	-0,1056	-0,1199	0,0104	-0,0359	-0,0369	0,0558
Indireto via T mín	0,4119	0,3730	0,2010	0,3716	0,3004	0,1043
Indireto via Ur	-0,4005	-0,2626	-0,2868	-0,3086	-0,2508	-0,2270
Indireto via Vv	-0,0019	-0,0008	-0,0011	-0,0011	-0,0009	-0,0006
Total (cor. Pearson)	0,0018ns	-0,0042ns	0,1702ns	0,0008ns	-0,0340ns	-0,0728ns
Coef determinação	0,30	0,15	0,21	0,34	0,19	0,20
Ef. variável residual	0,84	0,92	0,88	0,81	0,89	0,89

ns Não significativo pelo teste t; e \*\* Significativo a 1%, pelo teste t

Tabela 10A - Estimativa dos efeitos diretos e indiretos e correlação total entre a variável evapotranspiração obtida no Irrigâmetro e as variáveis temperatura máxima, temperatura mínima, umidade relativa, velocidade do vento e radiação para o mês de maio

<b>Temperatura máxima</b>	<b>Nível 1</b>	<b>Nível 2</b>	<b>Nível 3</b>	<b>Nível 4</b>	<b>Nível 5</b>	<b>Nível 6</b>
Direto sobre ET	-0,1408	-0,0337	0,8284	-0,3434	-0,3487	-0,7614
Indireto via T mín	0,7893	0,7798	-0,5179	1,0650	0,9998	1,3040
Indireto via Ur	-0,4448	-0,3481	0,0349	-0,1846	-0,2347	-0,1100
Indireto via Vv	-0,0170	-0,0293	0,0143	-0,0140	-0,0251	-0,0258
Indireto via Rad	0,0844	0,0495	-0,0141	-0,0037	0,0218	-0,0240
Total (cor. Pearson)	0,2710ns	0,4181ns	0,3454ns	0,5191**	0,4130ns	0,3827ns
<b>Temperatura mínima</b>						
Direto sobre ET	0,8243	<b>0,8144</b>	-0,5409	<b>1,1123</b>	<b>1,0442</b>	<b>1,3619</b>
Indireto via T máx	-0,1348	-0,0323	0,7932	-0,3288	-0,3339	-0,7290
Indireto via Ur	-0,5197	-0,4067	0,0407	-0,2157	-0,2743	-0,1285
Indireto via Vv	-0,0679	-0,1167	0,0566	-0,0558	-0,0999	-0,1028
Indireto via Rad	0,1537	0,0901	-0,0257	-0,0067	0,0397	-0,0438
Total (cor. Pearson)	0,2556ns	0,3488ns	0,3239ns	0,5050**	0,3757ns	0,3577ns
<b>Umidade relativa</b>						
Direto sobre ET	<b>1,0689</b>	<b>0,8365</b>	-0,0838	0,4437	0,5641	0,2644
Indireto via T máx	0,0585	0,0140	-0,3447	0,1429	0,1451	0,3168
Indireto via T mín	-0,4008	-0,3959	0,2630	-0,5408	-0,5077	-0,6622
Indireto via Vv	-0,0435	-0,0748	0,0363	-0,0358	-0,0640	-0,0658
Indireto via Rad	-0,6027	-0,3534	0,1008	0,0263	-0,1554	0,1717
Total (cor. Pearson)	0,0803ns	0,0264ns	-0,0284ns	0,0365ns	-0,0179ns	0,0248ns
<b>Velocidade do vento</b>						
Direto sobre ET	-0,2660	-0,4573	0,2218	-0,2189	-0,3914	-0,4027
Indireto via T máx	-0,0090	-0,0021	0,0541	-0,0220	-0,0223	-0,0488
Indireto via T mín	0,2104	0,2079	-0,1381	0,2839	0,2660	0,3477
Indireto via Ur	0,1748	0,1368	-0,0137	0,0726	0,0922	0,0432
Indireto via Rad	-0,1512	-0,0886	0,0253	0,0066	-0,0390	0,0430
Total (cor. Pearson)	-0,041ns	-0,2033ns	0,1484ns	0,1222ns	-0,0939ns	-0,0175ns
<b>Radiação</b>						
Direto sobre ET	0,7270	0,4263	-0,1216	-0,0319	0,1875	-0,2071
Indireto via T máx	-0,0163	-0,0039	0,0962	-0,0399	-0,0405	-0,0884
Indireto via T mín	0,1743	0,1722	-0,1143	0,2352	0,2208	0,2880
Indireto via Ur	-0,8861	-0,6935	0,0695	-0,3679	-0,4677	-0,2191
Indireto via Vv	0,0553	0,0951	-0,0461	0,0455	0,0814	0,0838
Total (cor. Pearson)	0,0541ns	-0,0038ns	-0,1164ns	-0,1589ns	-0,0184ns	-0,1420ns
Coef determinação	0,31	0,38	0,16	0,38	0,27	0,24
Ef. variável residual	0,83	0,78	0,91	0,79	0,85	0,87

ns Não significativo pelo teste t; e \*\* Significativo a 1%, pelo teste t